Université du Québec

Thèse

présentée

à

L'NSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
(EAU)

Comme exigence partielle

du

Doctorat en sciences de l'eau

par

Djilali Benmouffok
Ingénieur (cartographie),
M.Sc. (photogrammétrie et télédétection)

Conception d'un modèle physiographique de Bassin versant à partir de modèle numérique d'altitude

Août 1993

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des images

I. Introduction et objectifs de la recherche

Ces dernières années ont vu le développement rapide des techniques informatiques et la chute de leurs coûts aussi bien au niveau de la capacité de stockage que de la vitesse de calcul et de manipulation des données. L'ordinateur n'est plus ce qu'il était, il y a une décennie, l'outil d'une caste de professionnels. Il a littéralement envahi les bureaux et même les domiciles.

De leur côté, les techniques de collecte, de transmission et de traitement des données ont fait un bond formidable avec l'avènement de l'ère des satellites de communication et d'observation de la terre et le développement de capteurs puissants et fiables. Ces techniques ont révolutionné les méthodes conventionnelles de cartographie de la surface terrestre et de son couvert. La télédétection (TDT) est devenue un outil privilégié de collecte de données et d'information sur les ressources naturelles et environnementales au niveau synoptique dans le cas de la TDT satellitaire et au niveau local pour la TDT aéroportée et terrestre.

Le développement des systèmes d'information à référence spatiale (SIRS), plus communément appelés systèmes d'information géographique (SIG), capables d'analyser plusieurs strates de données de différente nature, de différentes sources et à différentes échelles vient compléter la panoplie des outils informatiques mis à la disposition des décideurs, des chercheurs et des ingénieurs, pour exercer de façon mieux informée et plus efficace leurs fonctions.

Les chercheurs, plus particulièrement les spécialistes en sciences de la terre, prennent avantage des techniques citées ci-dessus et se tournent de plus en plus vers l'utilisation des méthodes numériques d'analyse, de représentation et de modélisation spatiale des phénomènes naturels dont l'utilisation serait impensable sans ces outils. Les hydrologues ne sont pas restés en marge de cette tendance. Ils ont bien vite réalisé le potentiel que ces techniques leur offraient pour modéliser les phénomènes reliés au cycle hydrologique (précipitation, changement d'état, écoulement, évaporation, etc.) et la possibilité de combiner les procédés de discrétisation et de globalisation des événements.

Durant les années 1970, une équipe de chercheurs de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau) a conçu et développé un modèle hydrologique appelé CEQUEAU. Le modèle CEQUEAU est un modèle déterministe et matriciel qui permet de calculer les débits en n'importe quel point du bassin à partir de données hydro-météorologiques et de données physiographiques. La discrétisation du bassin en éléments carrés "carreaux entiers" subdivisés par les lignes de partage des eaux en "carreaux partiels" rend possible la prise en compte de la variation spatiale et temporelle des caractéristiques des bassins et facilite l'utilisation de la télédétection pour définir les caractéristiques physiographiques (Morin, 1981).

Dans un travail de recherche sur l'intégration des données physiographiques obtenues à partir d'images LANDSAT au modèle hydrologique CEQUEAU", nous avons développé une méthodologie de cartographie de la couverture et de l'utilisation des sols pour la constitution de la banque des données physiographiques d'entrée au modèle (Benmouffok, 1983). L'utilisation de la TDT satellitaire a permis, dans ce cas précis, d'obtenir des données d'entrée fidèles à la réalité et conformes aux exigences temporelles, spatiales, et en précision du modèle CEQUEAU". Nous avons alors réalisé le potentiel de l'application de la TDT à la définition des paramètres des modèles hydrologiques.

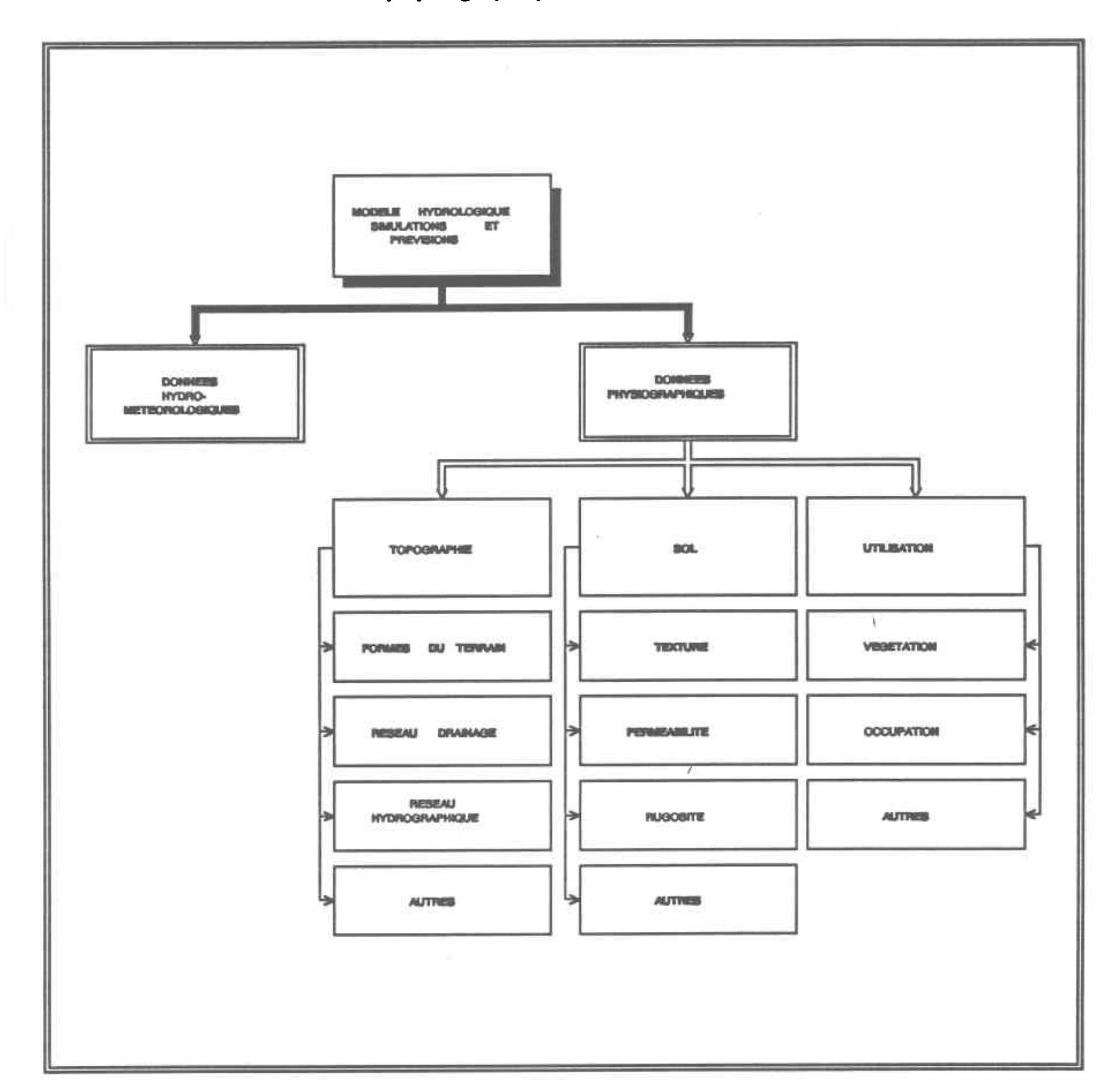
A. But, objectif et portée de la thèse

Les résultats encourageants obtenus avec l'intégration des données de télédétection au modèle CEQUEAU (Benmouffok *et al.*, 1985), les succès de la TDT et l'avancement de la micro-informatique ont motivé une équipe de chercheurs de l'INRS-Eau à travailler au développement d'un modèle de prévision hydrologique (Fortin *et al.*, 1986), sur micro-ordinateurs, capable d'utiliser le potentiel offert par la TDT.

Le but de cette thèse est de procurer à ce modèle un outil de développement économique et facile d'utilisation, capable d'intégrer les connaissances de la télédétection, de la topographie et de l'informatique pour faire de l'analyse de terrain (figure 1). Cet outil devrait permettre d'extraire les caractéristiques physiques des

bassins versants à partir de modèles numériques d'altitude (MNA) et de les présenter sous forme directement assimilable par les modèles hydrologiques.

FIGURE 1 Données physiographiques d'entrée d'un modèle hydrologique



Cet outil est conçu pour analyser la physiographie des bassins versants et en définir les caractéristiques: contours, pentes, orientation des pentes, plateaux, dépressions et réseau de drainage à partir de modèles numériques d'altitude. Ces

caractéristiques sont ensuite présentées sous une forme compatible pour servir de données d'entrée au modèle hydrologique HYDROTEL. Les donnée de sortie du modèle peuvent être utilisées pour corriger les valeurs d'altitudes erronées des MNA. Elles peuvent aussi être exploitées, en complément des données spectrales, pour l'interprétation des images satellitaires.

L'objectif général de ce travail est donc de développer un modèle d'analyse automatique de la physiographie des bassins versants à partir de modèles numériques d'altitude. Le modèle doit être applicable à tout type de bassin (accidenté ou à faible topographie). Il doit fonctionner sur des micro-ordinateurs de type IBM PC, dans l'environnement DOS et accepter des MNA matriciels comme données d'entrée. Il doit aussi permettre à l'utilisateur de choisir la dimension des carreaux de la grille du MNA. Nous rappelons que la partie développement de ce travail a été réalisé essentiellement entre 1985 et 1989.

Ce modèle, "PHYSITEL", est un modèle déterministe matriciel qui prépare la base des données topographiques du bassin pour utilisation ultérieure par le modèle HYDROTEL. Bien qu'il soit spécifiquement conçu pour fonctionner avec HYDROTEL, PHYSITEL devra pouvoir être utilisé séparément pour d'autres applications, dans différentes disciplines des sciences de la terre. Il devra être modulaire et permettre des développements ultérieurs tels: la détermination de la composition et de l'utilisation des sols, l'intégration de données spatiales dans les unités hydrologiques et la détermination des relations entre ces unités au travers du réseau de drainage.

La portée de ce travail est donc la production d'un outil capable de produire l'information sur les caractéristiques physiques des bassins hydrologiques.

B. Problématique

Les méthodes standards de représentation de l'information topographique tridimensionnelle dans un espace bidimensionnel, à l'aide de courbes de niveaux, de points côtés, de hachures, de teintes dégradées et d'ombrages, permettent de dériver de l'information qualitative et quantitative sur les formes du terrain. Les teintes donnent un bon aperçu de la forme générale du relief. Les courbes de niveaux font

ressortir l'information qualitative sur les crêtes et les cols et l'information quantitative sur l'altitude de points. Les points côtés mettent en évidence les éléments caractéristiques du terrain tels les sommets de collines, les intersections de routes, les fonds de dépressions, les lits de cours d'eau, etc. Grâce à ces techniques graphiques, la carte topographique traditionnelle fournit à l'utilisateur un grand volume d'information sur le terrain.

Il y a cependant des situations où l'information extensive sur les paramètres physiographiques de terrain est nécessaire, c'est le cas des travaux de génie en construction (ports, barrages), communications (routes, voies ferrées, lignes de transmission), planification et aménagement des ressources naturelles, recherche géologique et minière et modélisation hydrologique. Dans ces domaines, les mesures et les calculs sont effectués sur des bases spatiale et temporelle et sur des formes particulières de terrain. Le développement d'un modèle physiographique qui répond à ce type de demandes et qui peut fournir l'information, sous des formes directement assimilables par des micro-ordinateurs, trouve facilement sa justification.

L'analyse bibliographique suggère deux approches fondamentales pour le développement d'un modèle physiographique:

- La première, par extraction des formes topographiques directement à partir d'images de télédétection (Rui *et al.*, 1986). Cette approche est basée sur l'analyse des effets de la topographie sur la réflectance spectrale. Elle est facilement intégrable aux techniques d'analyse d'images de télédétection, mais elle ne permet pas de quantifier et de tracer automatiquement ces formes.

- La deuxième est celle préconisée par Band (1984, 1986 et 1989) et par EROS Data Centre du U.S. Geological Survey (Jenson et Domingue, 1988). Elle est basée sur le calcul des paramètres physiques du terrain à partir de modèles numériques d'altitude et sur l'utilisation de ces paramètres pour délimiter de façon automatique le contour du bassin et le réseau de drainage.

Des recherches et analyses ont montré que la deuxième approche est plus prometteuse et répond mieux aux besoins de la modélisation quantitative en

hydrologie. Aussi, avons-nous opté pour cette seconde approche dans le cadre de notre recherche.

Il est à noter que malgré l'intensification des recherches des dernières années, plusieurs problèmes critiques sont encore restés irrésolus. C'est le cas de grandes étendues à relief plat, où il est difficile sinon impossible de déterminer la direction de l'écoulement de l'eau. Le développement d'un algorithme capable de traiter ces étendues constitue un objectif spécifique de ce travail.

C. Approche méthodologique

Pour que les résultats de la recherche soient largement utilisables, les MNA doivent être facilement accessibles, c'est-à-dire disponibles sur n'importe quel bassin hydrologique et à des coûts raisonnables. Pour le moment, aucune de ces conditions n'est encore réalisée. les agences nationales de cartographie sont en voie de remédier à ces inconvénients. Elles s'engageant de plus en plus activement dans la production de cartes numériques.

L'approche méthodologique préconisée pour le développement du modèle PHYSITEL comporte cinq étapes principales, qui sont:

1. Conception du modèle

Cette étape comporte la définition des concepts, la détermination des besoins, l'analyse bibliographique des différents thèmes afférents au sujet, la revue exhaustive des approches possibles et des modèles et algorithmes d'analyse de terrain existants, le choix ou la conception de modèles nouveaux et leur intégration en un système complet et d'utilisation facile.

2. Design préliminaire

Nous parlerons de développement d'algorithmes et d'établissement d'ordinogrammes de fonctionnement, et plus spécifiquement de:

- détermination les caractéristiques physiques des bassins versants utiles aux modèles hydrologiques;

- définition et développement d'algorithmes appropriés pour extraire chacune de ces caractéristiques;

- détermination des entrées et sorties des algorithmes; et

- simulation du fonctionnement logique de chacun des algorithmes;

3. Développement

Cette phase consiste à:

- programmer les algorithmes et les tester sur un échantillon de bassin versant;

- simuler les situations particulières et tester la réaction des programmes à ces situations;

- apporter à l'algorithme les modifications qu'imposent ces situations pour le rendre plus efficace;

- refaire le cycle jusqu'à obtention de résultats satisfaisants pour les cas envisagés.

4. Assemblage des programmes

Dans cette étape nous procéderons à:

- assembler tous les programmes et fonctions développées en un logiciel modulaire, souple, homogène, facile d'utilisation; et

- tester le logiciel complet sur un bassin versant.

Nous préconisons une approche de type essai et erreur pour le développement de PHYSITEL. Nous utilisons le langage de programmation "C" de Microsoft et notre stratégie de programmation est basée sur la recherche du compromis entre la rapidité d'exécution, l'utilisation rationnelle des mémoires (active et de stockage) et la modularité des programmes.

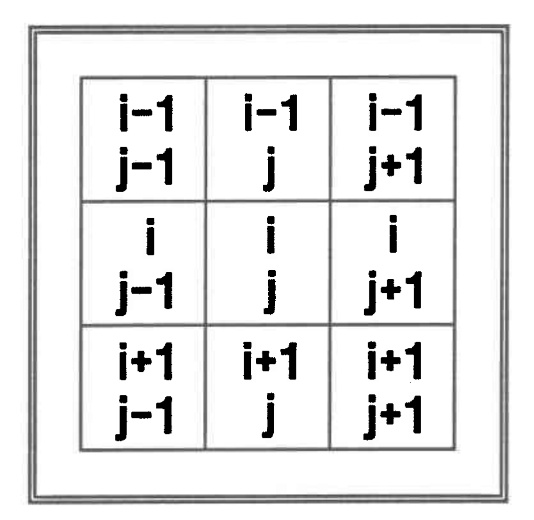
II. Définitions et concepts

Dans ce paragraphe nous tenterons d'expliquer les concepts et de définir les objets et méthodes qui seront utilisés dans le cadre de la recherche et qui sont nouveaux aux spécialistes en sciences de l'eau.

A. La géométrie numérique

En physique une image est définie par une fonction spatiale de deux variables F(x, y). La fonction peut prendre des valeurs de k-tuples de brillance dans plusieurs bandes spectrales ou de niveaux de gris dans le cas d'une image panchromatique. Les fonctions d'image sont supposées bien conditionnées du point de vue analytique, soit intégrables et munies de transformées de Fourier inversibles. L'image numérique est le produit de l'échantillonnage et de la quantification de l'image analogique d'un espace objet dans un référentiel spatial régulier. L'image numérique n'est en fait qu'une série régulière de nombres entiers appelés "pixels".

FIGURE 2 Fenêtre ou noyau



Sauf en bordure de l'image, tout pixel a huit voisins: deux horizontaux, deux verticaux et quatre diagonaux. La configuration de base que nous utiliserons très souvent dans les calculs est une fenêtre de neufs carreaux connectés (figure 2) que nous appellerons "Noyau".

Nous ne rentrerons pas dans le théorie analytique de la structure des images qui est fort complexe et qui est utilisée dans le domaine du traitement numérique des images (ensembles flous, segmentation d'image, érosion-dilatation, relaxation, analyse de texture, corrélation croisée, et autres), notamment dans le domaine de la reconnaissance automatisée des formes et des objets. Dans ce travail nous nous limiterons à l'emploi de notions de base tels les extremums, les bordures, le voisinage, le seuil et le gradient.

Nous utiliserons aussi les concepts de connectivité des pixels ainsi que d'autres caractéristiques morphométriques telles les puits, qui ont une importance primordiale dans les traitements numériques des images.

B. L'imagerie du satellite SPOT

Le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par un espace-objet est reçu par un capteur à bord d'un satellite sous forme d'une image multidimensionnelle.

Cette image est enregistrée sous forme numérique en temps réel à bord du satellite, ou sur support photo-sensible et numérisée ultérieurement au sol.

L'imagerie du satellite français d'observation de la terre (SPOT) constitue la principale source de données pour l'obtention de MNA. Le satellite SPOT a été lancé en février 1986 et rendu opérationnel en mai de la même année. La charge utile de ce satellite est constituée de deux radiomètres à haute résolution dans le visible (HRV) indépendants et de systèmes d'enregistrement et de transmission des données au sol. Ces radiomètres ont été conçus pour fonctionner selon les modes panchromatique et multispectral. Le mode panchromatique consiste en une large bande spectrale avec une résolution spatiale de 10 mètres au sol et le mode multispectral, en trois bandes spectrales étroites avec une résolution spatiale de 20 mètres. Le choix des bandes spectrales est basé sur les signatures spectrales des objets terrestres connus et sur les capacités de minimiser les effets atmosphériques sur ces signatures spectrales.

La résolution spatiale plus fine du satellite SPOT, 10 mètres au lieu de 30 mètres pour TM, et sa capacité de visée latérale le distinguent des satellites civils américains de la série LANDSAT qui l'ont précédé. La visée latérale lui permet d'assurer l'observation plus fréquente d'une région quelconque de la terre, avec une périodicité pouvant atteindre une journée dans des cas très particuliers. Le dépointage des capteurs rend possible, d'une part, le suivi des phénomènes localisés à évolution rapide et, d'autre part, l'obtention d'images stéréoscopiques d'une même scène. Cette stéréoscopie permet la détermination du relief et la photo-interprétation tridimensionnelle. Les caractéristiques principales de SPOT sont résumées dans le tableau 1.

Un autre satellite de la série SPOT baptisé SPOT-2 a été lancé en janvier 1990. SPOT-3, identique à ses prédécesseurs, est en cours de construction et le Gouvernement français a pris la décision de démarrer la réalisation de SPOT-4.

L'imagerie SPOT peut être acquise en temps réel sur presque la totalité de la surface du globe à l'exception de l'Extrême-Sud de l'Argentine et du Chili, du Centre-Ouest de l'Inde, et du Centre-Ouest de l'Afrique. La réactivation de SPOT 1 et la modification de son phasage par rapport a SPOT 2 autorisent, sous certaines

TABLEAU 1 Caractéristiques principales du satellite SPOT

NN	CARACTÉRISTIQUES	MULTISPECTRAL	PANCHROMATIQUE
1	BANDES SPECTRALES bande 1 bande 2 bande 3	 0.50 - 0.59 (μm) 0.61 - 0.68 (μm) 0.79 - 0.89 (μm)	 0.51 - 0.73 (μm)
2	GÉOMÉTRIE champ dépointage résolution pixels lignes	 4.13° ±27° 20 x 20 (m) 3000 3000	 4.13° ±27° 10 x 10 (m) 6000 6000
3	INFORMATION codage/pixel débit	 8 bits 25 Mbits/s	 6 bits * DPCM 25 Mbits/s

conditions, des prises de vue stéréoscopiques quasi simultanées, utilisant les deux satellites, avec un rapport B/H de l'ordre de 1 et l'écart de temps de l'ordre de l'heure.

C. La modélisation hydrologique

Un modèle est une image physique ou mathématique qui met en évidence les caractéristiques intrinsèques et la dynamique du système représenté. Le modèle prend toute sa valeur et sa signification lorsqu'il permet, d'une part, d'améliorer notre connaissance du système qu'il représente et de ses éléments constitutifs et, d'autre part, de reconstituer son comportement et sa dynamique dans le temps et dans l'espace. Matériellement, il existe deux catégories de modèles: les modèles physiques et les modèles symboliques. Les modèles physiques traduisent le système sous sa forme réelle analogique réduite. Les modèles symboliques traduisent le système dans un langage symbolique. Les modèles symboliques les plus utilisés en hydrologie sont les modèles mathématiques analytiques.

Le modèle analytique est constitué d'un ensemble d'équations liant différentes variables et différents paramètres pour produire de l'information sur ce système

exploitable dans des applications sectorielles variées. Selon la dynamique spatiale et temporelle qu'ils font intervenir, les modèles analytiques peuvent être différentiels ou intégraux, en temps discrets ou continu. Selon que l'équation qui le décrit est certaine ou aléatoire, le modèle est déterministe ou statistique respectivement. Lorsque la fonction explicite qui décrit la relation entre les données de sortie et les données d'entrée du modèle est établie à partir de considérations connues du processus physique, le modèle est conceptuel; dans le cas contraire, il est dit empirique ou synthétique ou encore de type "boîte noire". Si dans un modèle on tient compte de la distribution spatiale de la variable d'entrée ou encore de la variation spatiale des paramètres, le modèle est dit distribué. Autrement, il est global. Selon que l'on tienne compte de la configuration géométrique des points du réseau d'observation des données d'entrée ou non, le modèle est dit distribué de façon géométrique ou probabiliste.

Les modèles les plus couramment utilisés peuvent être regroupés en quatre catégories établies d'après les fonctions de base liées à leur utilisation:

- Une fonction cognitive sert à représenter les relations existantes entre les variables d'entrée et les variables de sortie du système.

- Une fonction prévisionnelle permet de prévoir l'évolution des variables de sortie du système en fonction de l'évolution des variables externes et d'hypothèses fixant les variables de commande.

- Une fonction décisionnelle sert à déterminer comment fixer les variables de commande pour atteindre les objectifs que l'on s'est fixé en sortie.

- Une fonction normative sert à établir les relations souhaitées entre les variables d'entrée et de sortie du système.

Bien que certaines des catégories citées plus haut s'excluent mutuellement, il est extrêmement rare qu'un modèle donné réponde strictement à l'une ou l'autre des catégories. La majorité des modèles développés en hydrologie possèdent plusieurs de ces caractéristiques, en même temps.

D. Les modèles numériques de terrain (MNT)

Jusqu'à très récemment, les données d'altitude n'étaient représentées et conservées que sous formes analogiques (hachure, ombrage, courbes de niveau, point côtés, modèles physiques 3D). Bien qu'elles donnent l'illusion tridimensionnelle et que certaines d'entre elles, en particulier les courbes de niveaux, fournissent de l'information quantitative sur le relief, ces formes ne sont pas directement exploitables par les ordinateurs numériques. Le modèle numérique de terrain (MNT) est la représentation numérique du terrain obtenue à partir d'un échantillon représentatif et suffisant de données planimétriques et altimétriques. Le nombre et la distribution des points échantillons dans le MNT sont tels que tout point de la surface représentée pourrait être automatiquement interpolé, avec la précision requise pour une application donnée. Le MNT inclut les attributs du paysage tels le couvert végétal et forestier, les objectifs naturels ou dus à l'activité de l'homme, etc. Le MNT est conçu pour être utilisé par des ordinateurs. Il comporte quatre composantes inter-reliées (figure 3):

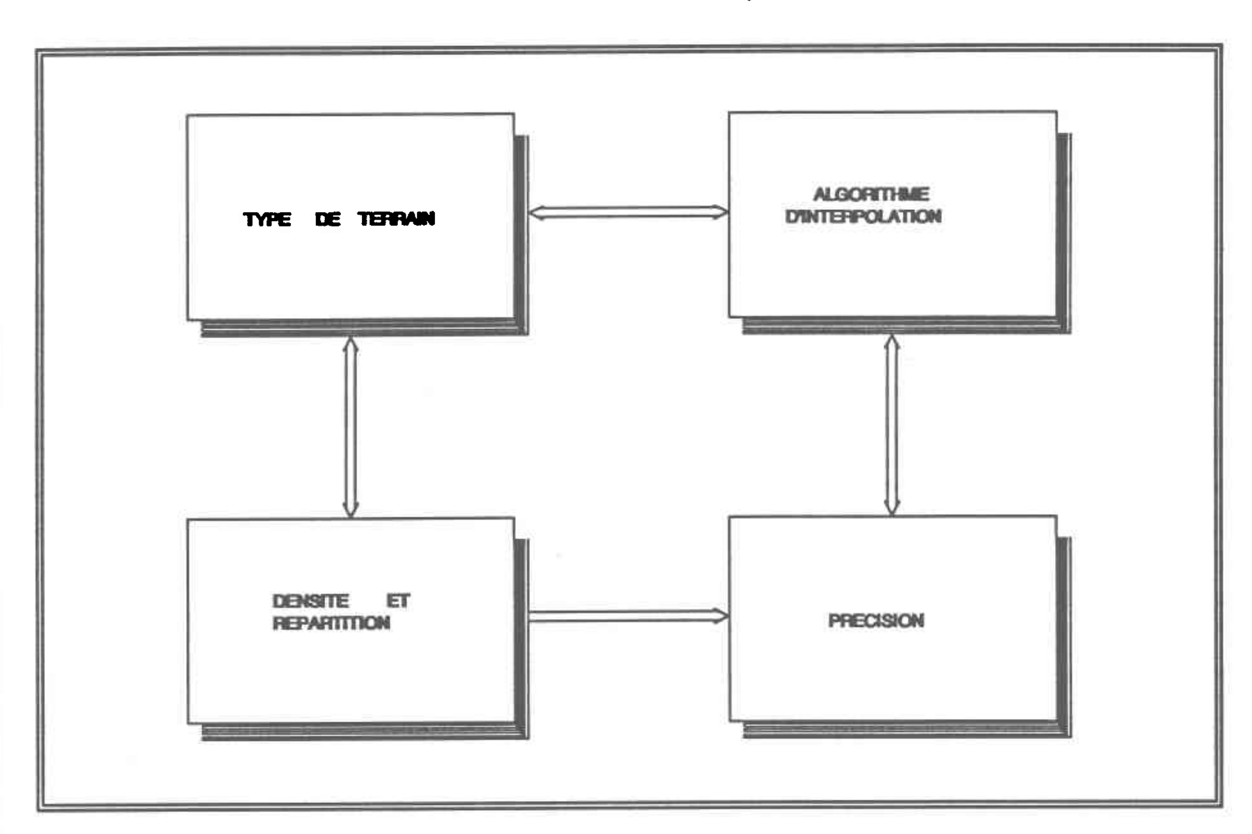
- le type de terrain;
- les données d'entrée;
- l'algorithme d'interpolation; et
- la précision.

Le type de terrain est lié de façon réciproque à la densité et à la distribution des données et à l'algorithme d'interpolation. L'algorithme d'interpolation est choisi en fonction de la précision requise. La précision dépend des données disponibles. Les composantes du MNT sont ainsi interdépendantes.

On peut distinguer, en fonction de la régularité de l'espacement des points échantillonnés, plusieurs types de MNT:

- à contours;

FIGURE 3 Interaction entre les composantes du MNT



- à profils;

- à grille irrégulière; et

- à grille régulière.

Dans les MNT à contours, les isolignes sont numérisées à intervalles réguliers d'altitude ou de temps. Ces intervalles peuvent toutefois varier d'une zone homogène à l'autre: diminuer dans les zones accidentées et augmenter dans les zones planes. Les MNT à profils sont caractérisés par des points numérisés à intervalle régulier dans l'un ou l'autre des axes des coordonnées planimétriques, suivant des profils de terrain. Ces modèles sont utilisés en génie. Les MNT à grille irrégulière sont conçus à partir de points situés aux noeuds caractéristiques du terrain, par exemple les points de changement de pente. Ces modèles décrivent adéquatement le terrain, avec un minimum de points. Dans les MNT à grille régulière, les points se situent sur une grille régulière. Parmi ces derniers modèles, ceux à grille carrée sont les plus fréquents. Ils

permettent une économie de mémoire de stockage et ils conviennent mieux à l'organisation matricielle "raster" des données spatiales.

Les MNT peuvent être obtenus:

- par numérisation manuelle, semi-automatique (stylets, souris) ou automatique (scanners) de cartes et plans topographiques;

- par stéréorestitution photogrammétrique de couples stéréoscopiques de photographies aériennes;

- par relevés directs à l'aide de radars et lasers altimètres; ou

- de l'imagerie du satellite SPOT par des techniques de corrélation et de filtrage.

TABLEAU 2 Mode d'acquisition des MNT

NN	SOURCE	MODE	PRODUITS
1	Directes	Radar Laser altimétre	Profils Profils
2	Photogrammétrie	Stéréorestitution Analogique Analytique Automatique	 Isohypses Canevas Raster
3	Cartes	Numérisation Manuelle Semi-automatique Automatique	 Polygones Polygones Raster
4	Satellites	Corrélation Arêtes Surfaces	 Raster Raster

Les MNT obtenus par stéréorestitution sont les plus précis. Cette méthode reste encore la technique la plus utilisée en cartographie fondamentale, en génie et en architecture qui requièrent des précisions élevées pour l'élaboration de cartes et plans à grandes échelles. La stéréorestitution présente, cependant, quelques inconvénients majeurs:

- Elle nécessite des équipements spécialisés et coûteux.

- C'est une opération manuelle laborieuse qui exige une qualification professionnelle considérable de l'opérateur.

- Elle nécessite des données d'entrée analogiques (films ou tirages photographiques).

E. Les modèles numériques d'altitude (MNA)

Les notions que nous avons introduites plus haut sur le MNT s'appliquent aussi au modèle numérique d'altitude (MNA) qui sera utilisé tout au long de ce travail. Le MNA est un canevas de valeurs d'altitude correspondant à la partie altimétrique du MNT dont les coordonnées planes sont implicites (figure 4)

Dès leur apparition, les MNA ont joui d'une grande popularité. Ils sont utilisés dans différents secteurs (cartographie, météorologie, foresterie, exploitation minière, génie, transports, défense, etc.). Les MNA ont ouvert des horizons nouveaux aux spécialistes en ressources environnementales dont les travaux sont reliés à la physiographie du terrain. C'est le cas de l'hydrologie, où le relief du terrain et les propriétés des sols jouent un rôle prépondérant sur le cycle hydrologique (précipitation, ruissellement, infiltration, évapotranspiration) et le transport de matériaux solides.

La précision altimétrique du MNA dépend de son mode d'acquisition. Elle peut varier de quelques millimètres, dans le cas de restitutions photogrammétriques à grande échelle, à quelques mètres, pour les MNA dérivés de l'imagerie du satellite SPOT. Les données topographiques utilisées dans les modèles hydrologiques

FIGURE 4 Exemple de modèle numérique d'altitude

316	318	316	308	292	284	275	243	267	259	251	259	324	356	365
319	324	319	318	314	308	300	251	284	300	258	284	308	326	324
332	326	340	332	330	332	306	253	292	316	292	261	275	277	275
327	356	365	350	348	334	300	274	300	324	332	348	326	324	332
358	373	374	373	356	316	284	275	301	322	363	365	363	365	389
371	389	387	379	348	299	301	278	276	308	340	366	373	381	411
356	373	381	373	340	324	340	308	292	290	300	340	348	374	415
374	324	405	379	348	342	356	363	356	324	301	308	308	330	389
373	381	413	411	373	365	373	397	387	340	308	356	373	332	334
340	365	421	423	405	389	381	405	389	356	309	365	397	395	348
342	381	429	454	437	421	407	413	390	365	316	373	403	407	405
348	397	437	438	444	446	436	429	405	381	324	374	405	429	431
373	399	403	413	454	470	444	436	413	389	332	381	413	421	462
389	404	405	415	446	447	437	429	397	390	348	373	397	437	486
429	437	446	438	429	433	436	462	454	405	355	356	381	421	478

proviennent en général de cartes au 1:50 000 et de cartes à plus petites échelles. La précision des MNA obtenus des données du satellite SPOT répond aux normes de la carte au 1:50 000 et satisfait les besoins des modèles hydrologiques.

F. Les caractéristiques de terrain

La valeur de l'information dépend de la demande et de la manière dont elle est utilisée. Comprendre le concept de l'organisation de l'information spatiale est primordial, pour dériver les caractéristiques du terrain de façon automatisée - que ce soit à partir d'observations directes ou d'images. Il faut connaître les éléments d'information pertinents pour des applications projetées, avant de procéder à l'extraction et l'échantillonnage de ces caractéristiques à partir d'images. Makarovic (1984) fait une analyse intéressante du cadre général de la structuration de l'information géographique. Il fait la distinction entre l'information de base et les données de contrôle. Il identifie les relations entre l'extraction d'information,

l'échantillonnage et la structuration. Il préconise la systématisation de l'extraction des éléments morphométriques qui entrent dans la composition du MNT.

Dans les années soixante, Shreve (1966 et 1967) définit les concepts de l'information topologique sur les cours d'eau et les réseaux de drainage, qui servirent de base aux lois empiriques de Horton (1945) et ouvrirent pas mal de perspective sur la systématisation de la physiographie fluviale. Il s'agit de définitions quantifiables des cours d'eau telles:

- Le réseau de drainage est l'ensemble de canaux situés à l'amont d'un point exutoire donné, arbitrairement choisi dans le système de drainage.

- Le bief est une section de canal entre deux jonctions successives - entre la source et la première jonction à l'aval, ou entre l'exutoire et la première jonction à l'amont.

- les biefs sont terminaux s'ils ont une source comme extrémité amont et intermédiaires, s'ils ont une jonction comme extrémité amont.

- Un réseau de drainage de (n) sources a (n) biefs terminaux, (n - 1) jonctions et (n - 1) biefs intermédiaires.

Scheidegger (1967) a défini d'autres relations quantifiables et encodables des réseaux de drainage. Smart (1970) a utilisé la codification binaire pour représenter les réseaux de drainage facilement assimilables par les ordinateurs:

- Le processus de codage commence par l'exutoire et remonte le réseau en tournant à gauche à chaque jonction et en faisant demi-tour à chaque source;

- Les biefs terminaux sont codés par (1) et les biefs intermédiaires par (1);

- La chaîne binaire représentant un réseau de drainage de (n) sources comprend (n) uns et (n - 1) zéros, le premier chiffre étant zéro et les deux derniers des uns, sauf dans le cas trivial d'un réseau avec un seul bief.

Les applications d'une telle représentation des réseaux de drainage sont nombreuses. Vu que chaque élément du réseau (source, bief, jonction) est identifiable de façon univoque, on peut par exemple détecter les réseaux de drainage topologiquement semblables, parce que représentés par une même chaîne binaire. Il est aussi possible de rattacher des attributs à chacun des éléments du réseau et de faire de l'analyse de terrain pour différentes applications.

Collins (1975) définit les propriétés réelles de terrain qui peuvent être déduites à partir des altitudes de la manière suivante:

- L'altitude du terrain est l'altitude du point de la grille qui en est le plus proche.

- Le point de grille le plus bas par rapport à ses voisins représente le fond d'une dépression, le plus élevé étant le sommet d'une colline.

- Un bassin versant et une dépression ont des formes similaires et ne se distinguent que par le type de drainage: la première est pourvue d'un drainage externe et la seconde d'un drainage interne.

- Le déversoir est le point le moins élevé commun à deux ou plusieurs dépressions.

- La crête est l'ensemble des points communs à deux dépressions, le déversoir en est le point le plus bas.

- Le cours d'eau temporaire ou permanent peut être défini par le retournement du modèle de terrain, transformant les collines en dépressions et les crêtes en cours d'eau, à la différence près, que seul le cours d'eau peut inverser sa pente en créant une capacité de stockage.

- La surface du terrain peut être représentée de façon approximative par sa projection horizontale. Dans la projection UTM, la surface est égale au produit de la surface élémentaire de la maille par le nombre de mailles de la grille qui la composent.

- La pente et son orientation prises ensemble constituent le vecteur de pente, c'est la dérivée directionnelle de la fonction de l'altitude.

- Le changement de pente est une propriété réelle du terrain qui a une grande importance surtout pour l'écoulement.

- Le MNT est une source logique pour la détermination de statistiques sur la rugosité et les accidents du relief.

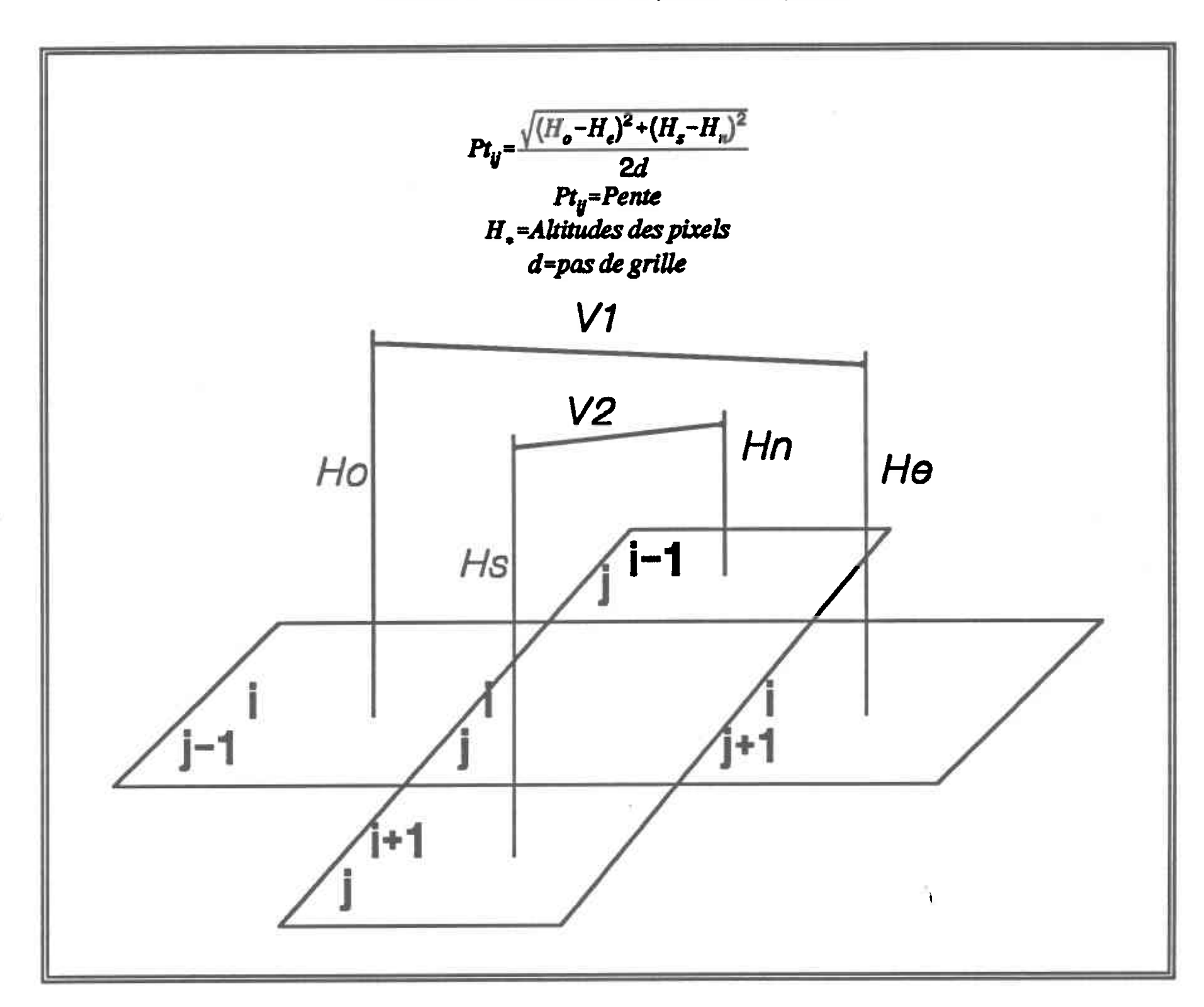
Tous ces développements ont une grande importance en modélisation hydrologique, car une fois les composantes physiographiques déterminées et quantifiées, il est plus aisé d'y coupler les composantes hydrologiques.

Les éléments morphométriques qui jouent un rôle primordial pour comprendre la dynamique de l'eau dans les bassins versants et que nous proposons d'extraire du MNA dans le cadre du modèle PHYSITEL sont les suivants:

- La pente d'un carreau qui est définie par l'angle que forme le plan du carreau avec sa projection horizontale.

- La longueur de la pente qui est la distance entre le centre du carreau et le centre de celui de ses huit voisins dans la direction de la plus forte pente (figure 5).

FIGURE 5 Calcul de la pente des pixels



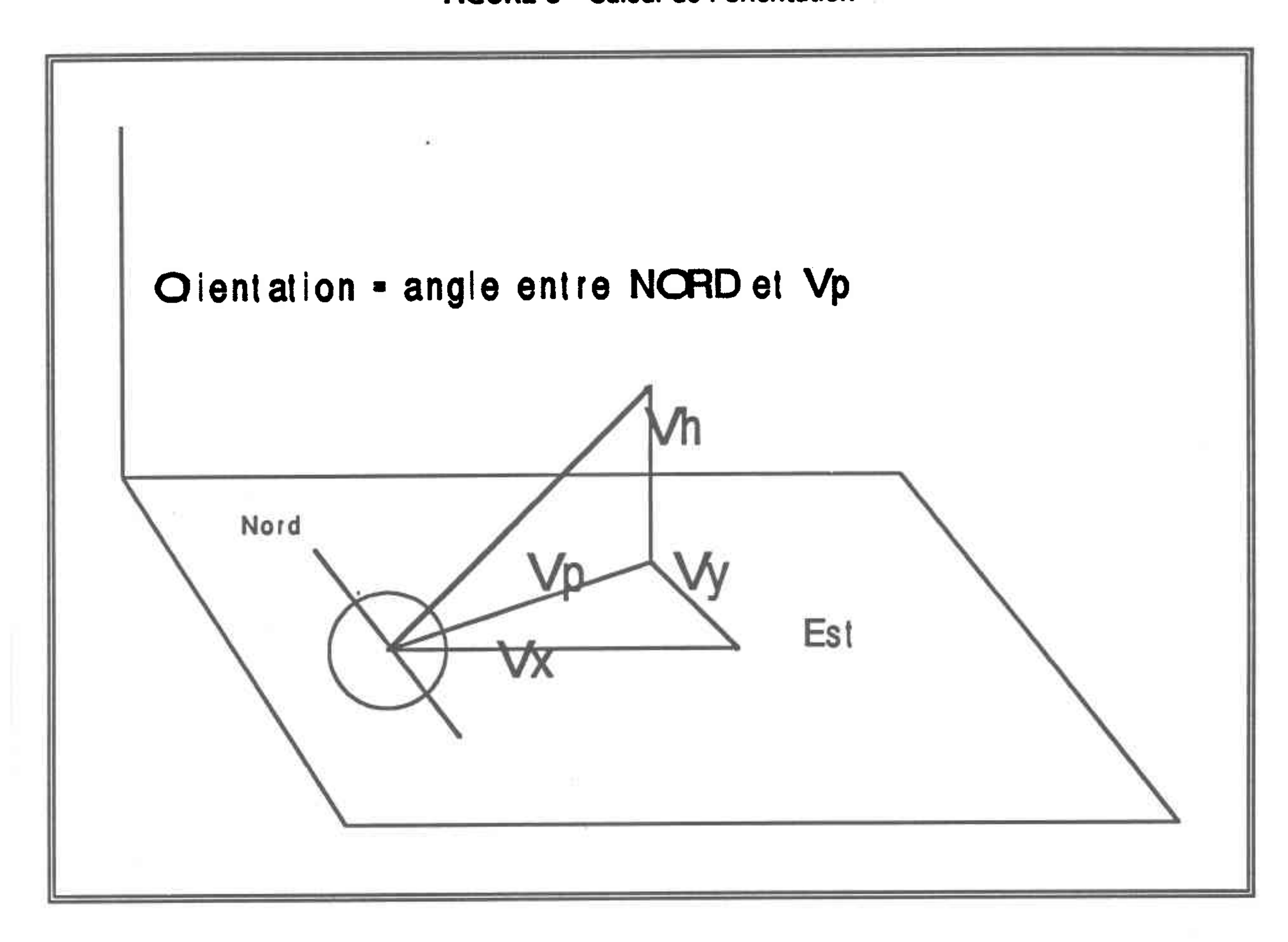
- L'orientation du carreau qui est l'angle formé par la projection de son vecteur normal sur le plan horizontal avec la direction du Nord (figure 6).

- Le puits est qui un carreau dont l'altitude est inférieure à celles de ses huit voisins (figure 7-a).

- Le sommet qui est un carreau dont l'altitude est supérieure à celles de ses huit voisins (figure 7-b).

- La dépression qui est l'ensemble de carreaux dont un ou plusieurs sont plats et constituent le fond et les autres, qui drainent vers ce fond, en sont les flancs.

FIGURE 6 Calcul de l'orientation



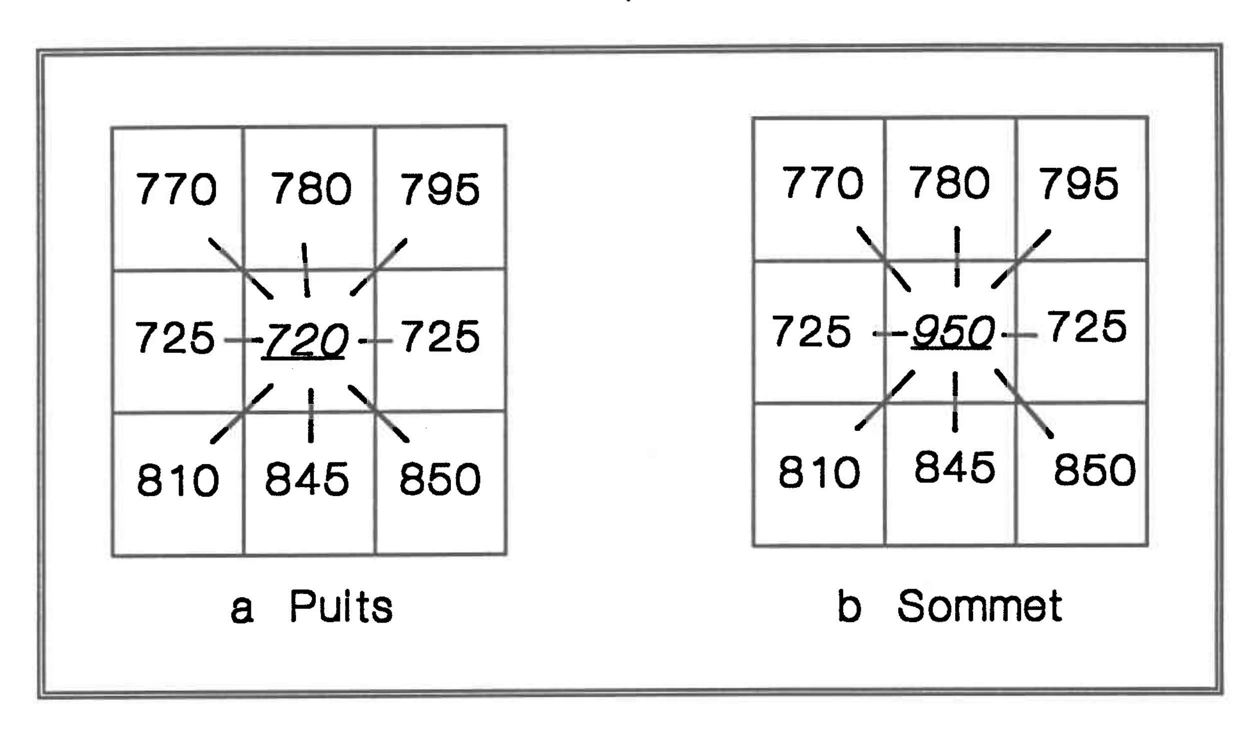
- Le bassin versant est l'aire qui déverse ses eaux de ruissellement vers un exutoire donné, il est délimité par les lignes de partage des eaux connectées.

- Le réseau de drainage est défini par la relation de drainage entre les carreaux qui composent le bassin versant.

III. Revue de la littérature

Les techniques photogrammétriques conventionnelles, avec une intégration plus ou moins importante de données satellitaires, sont les plus utilisées pour faire de l'analyse de terrain. Ces méthodes sont complexes et nécessitent l'intervention de professionnels ayant une formation approfondie en photogrammétrie. Le développement des technologies de traitements numériques d'images basées sur les micro-ordinateurs et la production de nouveaux produits, tels les modèles numériques

FIGURE 7 Exemples d'extremums



d'altitude (MNA), ont rendu l'analyse spatiale plus accessibles aux chercheurs et aux professionnels, dans différents secteurs de la gestion des ressources naturelles. L'utilisation de MNA et d'information spatiale permet la collecte et la synthèse rapides des données et leur intégration dans des systèmes de traitement d'image et d'information géographique. La quantification des caractéristiques physiques des bassins versant sur la base de MNA a ouvert de nouveaux horizons à la modélisation hydrologique.

Dans cette analyse bibliographique nous aborderons l'imagerie satellitaire et nous passerons en revue les modèles numériques de terrain et d'altitude, les modèles d'analyse de terrain, les modèles hydrologiques et les systèmes d'information géographiques.

A. Les méthodes d'obtention du MNA

L'avènement des données satellitaires a fortement stimulé la recherche de nouvelles techniques de production de MNA et le lancement de SPOT-1, en 1986 a permis de passer de l'étape de recherche à celle de développement de techniques

opérationnelles. Dans cette revue de littérature, nous n'aborderons que l'étude des MNA obtenus à l'aide de la télédétection.

Les premières tentatives fructueuses de développement de MNA à partir de l'imagerie par satellite utilisèrent les données du capteur MSS du satellite LANDSAT (Simard et Krishna, 1983). Cependant, la faible valeur du rapport de la base sur la hauteur (B/H de l'ordre de 10%), la faible résolution spatiale (50 mètres), la géométrie de visée (angle d'inclinaison inférieur à 6°) et l'instabilité de la plate-forme limitèrent la portée de ces premiers modèles.

Le satellite SPOT dont les objectifs incluent la restitution de la topographie a solutionné la plupart de ces problèmes:

- La résolution spatiale a été ramenée à 20 mètres en mode multibande et à 10 mètres en mode panchromatique.

- Les capteurs à barrettes de type "Push-Broom" règlent partiellement le problème de distorsions dues au miroir de balayage.

- Le satellite offre la possibilité de programmer et de dépointer les capteurs pour collecter des données dans un angle de 27 degrés de part et d'autre du zénith.

- La qualité radiométrique du signal (rapport signal/bruit) a été améliorée, grâce au système d'étalonnage absolu à bord du satellite.

Ces améliorations permettent d'obtenir des paires d'images stéréoscopiques avec des rapport B/H variant de 0,1 à 1,2 pour tout point du globe terrestre, à l'exception des calottes polaires, 0,5 en moyenne dans les latitudes centrales.

Le potentiel stéréoscopique de SPOT, sa résolution spatiale et la connaissance de la variation des paramètres d'attitude de la plate-forme offrent donc la possibilité de produire des cartes au 1:50 000 et au 1:100 000 avec la précision altimétrique de l'ordre de 10 mètres. Il existe trois méthodes de génération de MNA à partir de couples d'imagerie stéréoscopiques du satellite SPOT (Baudoin, 1984).

- La restitution analytique avec des restituteurs photogrammétriques, qui utilise des films comme données d'entrée. L'Institut géographique national français (IGN) a développé un logiciel sur le TRASTER de MATRA (Vigneron et Denis, 1984) qui accepte n'importe quelle géométrie d'image modélisée par une grille tridimensionnelle. Chaque point de la grille est associé avec ses positions sur les deux images du couple stéréoscopique et les autres points du terrain peuvent être interpolés à l'intérieur de la grille.

- La restitution stéréoscopique simplifiée, qui utilise des images analogiques corrigées pour les distorsions d'attitude de la plate-forme comme données d'entrée. Le restituteur mesure la parallaxe et déduit les altitudes des points. Cette méthodes donne des résultats de faible précision. Cependant, elle présente l'avantage de ne pas nécessiter d'équipements photogrammétriques couteux.

- La corrélation automatique, qui est basée sur l'appariement de points sur les deux images d'un couple stéréoscopique, la mesure de la parallaxe entre la position de ces points et la transformation de cette parallaxe en mesure d'altitude. Ce processus est presque complètement automatisé et utilise des couples d'images numériques comme données d'entrée.

La corrélation automatique s'impose de plus en plus comme méthode principale d'obtention des MNA à partir d'images de télédétection. Ceci est dû principalement à la nature numérique des données d'entrée, aux faibles coûts de traitement, à la simplicité d'exploitation et au développement accru de la micro-informatique. Il n'y a pas beaucoup de publications de disponibles sur les corrélateurs, à cause de la valeur commerciale de l'information sur ces techniques.

Les modèles de génération de MNA par corrélation comportent en général les composantes suivantes (Brockelbank et Tam, 1991):

- l'estimation des paramètres d'attitude du satellite (pour la mise à l'échelle);

- l'alignement épipolaire des images (correction de la parallaxe verticale);

- l'appariement stéréoscopique (détermination des points analogues sur les deux images du couple stéréoscopique); et

- la génération et la densification des points du MNA.

Il existe trois types de corrélation spatiale connus:

- la corrélation des surfaces, qui met en relation les surfaces sur les images conjuguées;

- la corrélation des formes, qui met en relation les formes; et

- les modèles hybrides qui utilisent une combinaison des deux types de corrélateurs.

Dans leur analyse de performance des différents types de modèles, Brockelbank et Tam (1991) conclurent que les corrélateurs de surfaces étaient les plus précis, mais que les corrélateurs de formes présentaient l'avantage de mieux refléter les changements de pentes de terrain, ce qui est important pour la fidélité de la représentation du relief. Ils testèrent les modèles sur deux types de terrain, l'un accidenté et l'autre relativement plat (1230 mètres et 205 mètres de dénivelé respectivement). Ils arrivèrent à des précisions de détermination des altitudes variant entre 8 mètres et 17 mètres.

Au Canada, plusieurs corrélateurs de surfaces opérationnels ont été développés par le Centre Canadien de télédétection (Simard et Krishna, 1983), DIGIM Lavalin (Leclerc, 1988) et Horler Information (HII). MacDonald Dettwiler (MDA) a développé un corrélateur de formes appelé GDEM (Swan *et al.*, 1987). GDEM est incorporé dans le système de traitement d'image MERIDIAN. La précision altimétrique de ces corrélateurs varie selon leurs auteurs de un quart de pixel à un pixel.

Le lancement de SPOT-2, l'approbation de SPOT-3 et SPOT-4 par le gouvernement français et aussi la décision de la NASA d'incorporer la stéréoscopie aux futurs satellites de la série LANDSAT, à commencer avec LANDSAT-7

(Colvocoresses, 1990) attestent du souci de continuité de programme d'utilisation de satellites pour la cartographie topographique. Le développement de corrélateurs se fait avec plus d'intensité et de persistance. Horler Information a, par exemple, implanté son corrélateur appelé Hi-View sur plusieurs types de micro-ordinateurs et de stations (PC, Sun, et Risc 6000). HII investit beaucoup d'efforts et de ressources dans le développement et la maintenance de Hi-View.

B. Les méthodes d'analyse de terrain

La complexité et les coûts de production de données de terrain par les méthodes conventionnelles (relevés directs, cartes et photographies aériennes) ont conduit les chercheurs à expérimenter d'autres méthodes plus rationnelles pour obtenir ces données. Les objectifs de la plupart des recherches sont la production de cartes et de plans topographiques, les études de génie pour la construction d'ouvrages civils, la protection et la conservation des sols et des eaux, la géologie et la géophysique. Les chercheurs en études des sols et les géomorphologues sont ceux qui ont le plus contribué à améliorer nos connaissances sur les méthodes d'analyse du terrain. Des experts dans d'autres disciplines (mathématiques, informatique, physique, génie, etc.) ont cependant pris une part active au développement de méthodes automatisées pour ce faire. De nouvelles techniques, où différents niveaux d'information incluant l'information dérivée à partir de cartes, de photographies aériennes, d'imagerie satellitaire, et de bases de données, ont été développées. L'apparition sur le marché de MNA dans les années soixante dix a fortement stimulé le développement de logiciels d'analyse automatique de terrain. Ces logiciels sont pour la plupart à l'état de développement et ils s'avèrent plus souvent qu'autrement incomplets pour les applications hydrologiques.

Les procédés analytiques de dérivation des descripteurs de terrain par utilisation d'approximations algébriques variées d'ajustement de surfaces (Fourier, polynomiales, multiquadric, collocation, etc.), avec ou sans contraintes (Junkins and Jancaitis, 1971, Hardy, 1972), ne semblent pas obtenir le succès escompté pour différents types de terrain. Ceci est dû à la nature non-analytique des surfaces du terrain. Celles qui donnent des résultats satisfaisants pour certains types de terrain sont

difficilement programmables. La plupart des chercheurs privilégient les techniques numériques. Ce sont ces méthodes que nous étudierons.

Speight (1968) a développé un algorithme qui reproduit le comportement hydrologique pour déterminer le réseau de drainage. Il simule la concentration des écoulements dans les carreaux et assigne au réseau de drainage ceux qui reçoivent une quantité d'eau au dessus d'un seuil d'écoulement donné. Deux démarches différentes sont alors possibles:

- La première est globale. Elle requiert l'accès aléatoire aux données d'altitude ou d'orientation des pentes, et nécessite un compteur de drainage pour chacun des carreaux. Son algorithme visite les carreaux d'amont en aval, jusqu'à ce qu'il atteigne une bordure du MNA ou un puits, et calcule le drainage.

- La seconde est locale. Dans ce cas, les pixels sont traités par ordre d'altitude décroissante, et chaque pixel n'est visité qu'une seule fois.

Selon Mark (1983), l'approche de Speight améliore nos connaissance des relations fonctionnelles entre la topographie, l'écoulement, les sources, et la structure du réseau de drainage.

Collins (1975) a développé un algorithme pour déterminer les caractéristiques du terrain à partir de MNT à grilles régulières. Il pose l'hypothèse que les valeurs des altitude du MNT brut sont suffisantes pour représenter fidèlement le terrain étudié et, qu'afin d'éviter de dériver des propriétés qui ne sont pas réellement contenues dans le MNT, celui-ci doit être utilisé tel qu'obtenu, sans modification par des techniques quelconques de lissage ou de correction. Collins est très sceptique quant à la possibilité de modélisation analytique du terrain. Les modèles analytiques impliquant que la surface du terrain et ses dérivées directionnelles sont continues, et que sa morphométrie est du domaine déterministe. Collins exclut autant que possible la notion de continuité du terrain, il ne l'introduit que dans des cas très limités, comme pour le calcul de la pente et de l'orientation. Il considère que les contours et les profils sont des propriétés abstraites et non des propriétés réelles du terrain, la pente

par contre en est une propriété réelle. L'algorithme développé par Collins fonctionne de la façon suivante:

- Il classe les points de la matrice des altitudes par ordre d'altitude croissante et crée ensuite un fichier vectoriel de ces points.

- Ensuite, partant de ce fichier, il définit les dépressions et leurs propriétés (superficie et volume), les crêtes, les déversoirs et les cours d'eau, à l'aide d'opérateurs locaux.

Collins a utilisé le langage APL pour développer la logique de l'algorithme. Il devait cependant le réécrire plus tard en PL1, langage plus approprié pour le tri et la gestion de fichiers. Malgré nos recherches, nous n'avons malheureusement pas pu mettre la main sur ce logiciel pour le tester.

Partant du principe que toute surface topographique concave ramasse l'eau de drainage, Peucker et Douglas (1975) ont développé un algorithme d'identification des réseaux de drainage à partir de MNA, qui obtient une approximation du réseau de drainage. L'algorithme fonctionne de la façon suivante:

- Il balaye la matrice du MNA de haut en bas, analyse les quatre carreaux mutuellement adjacents de façon séquentielle et marque le carreau le plus élevé des quatre. Les carreaux non marqués constituent le réseau de drainage.

Le programme HILO du "Digital Elevation Models Graphic System" (Kikuchi *et al.*, 1982) utilise une variante de cet algorithme pour détecter simultanément les vallées et les lignes de crêtes: les crêtes étant l'inverse des vallées. Ce type d'algorithme identifie aisément le réseau de drainage et les lignes de partage des eaux. Cependant, de nombreux pixels ou groupes de pixels, qui correspondent à des puits ou des dépressions locales, créent des discontinuités dans le réseau. Cette méthode est strictement locale, elle est rapide et elle n'utilise pas beaucoup de mémoire d'ordinateur.

Biggin (1977) a développé un programme de détermination automatique des pentes à partir de données numériques. Ce programme appelé SLOPE est une variante du programme CONTOUR II conçu au "Defense Mapping Agency Topographic Center" de Washington, D.C., pour générer les courbes de niveau topographique à partir de MNA. SLOPE convertit les altitudes en valeurs de pentes en ajustant par le moindre carré un plan à l'altitude au point considéré vers les altitudes voisines. La pente du plan dans la direction de l'inclinaison la plus élevée est prise pour pente du terrain au point considéré. L'avantage de cette méthode de cartographie des pentes sur les méthodes manuelles est évidemment sa rapidité, sa "répétitivité" et sa consistance. Cette méthode réduit considérablement le travail et les coûts de production (60% et 24% respectivement).

Eidenshink et Schmer (1979) présentent la méthodologie qu'ils ont développée pour intégrer des données de télédétection au modèle national d'amélioration de la qualité des ressources en eau ("Model Implementation Program"), commandité par l'Environmental Protection Agency de l'U.S. Department of Agriculture. La méthodologie utilise les techniques conventionnelles de collecte et l'interprétation des données, soit les photographies aériennes infrarouge couleur pour cartographier la couverture et l'utilisation des sols, et les cartes topographiques pour extraire les données sur les sols et les pentes.

La méthodologie conventionnelle la plus complète de détermination de paramètres topographiques pour des besoins d'étude d'érosion des sols est celle proposée par Snell (1984). Elle est décrite en détail dans le guide "Manual for regional targeting of agricultural soil erosion and sediment loading to streams". Cette méthode utilise les cartes topographiques au 1:25 000 pour déterminer graphiquement les paramètres physiques de zones homogènes du terrain.

Campbell *et al.* (1984) proposent une méthode économiquement fiable d'obtention de données d'entrée des modèles hydrologiques d'écoulements, directement à partir d'images satellitaires. Ils utilisent les modèles des effets de la topographie sur l'illumination des scènes de l'imagerie du satellite LANDSAT pour identifier les lignes de crêtes et les vallées et estimer les altitudes relatives des points. Les autres paramètres morphométriques (pentes, orientations, cours d'eau, lignes de

partage des eaux, dépressions, etc.), ainsi que les données d'occupation des sols sont ensuite déterminés à partir des données de base. Bien qu'imprécise et non transportable d'une région à une autre, cette méthode a le mérite d'obtenir l'information à partir d'une seule source de données, ce qui la rend très utile pour l'étude de régions éloignées peu ou pas cartographiées.

Catlow et Daosheng (1984) décrivent une série de programmes informatiques destinés a créer et organiser une base de données informatisée des cours d'eau du Royaume Uni. Ils permettent de numériser, rationaliser, structurer et généraliser les données sur les cours d'eau. C'est le genre de base de données que les modèles hydrologiques peuvent utiliser pour extraire les réseau hydrographiques par biefs.

Marks *et al.* (1984), présentent une solution simple et cohérente de délimitation automatique du bassin de drainage à partir d'un MNA. Elle consiste à

- déterminer les paramètres de pente (tangente et orientation) des pixels du MNA; et ensuite

- utiliser un algorithme récursif qui se sert de ces paramètres pour tracer le réseau de drainage et le contour du bassin versant.

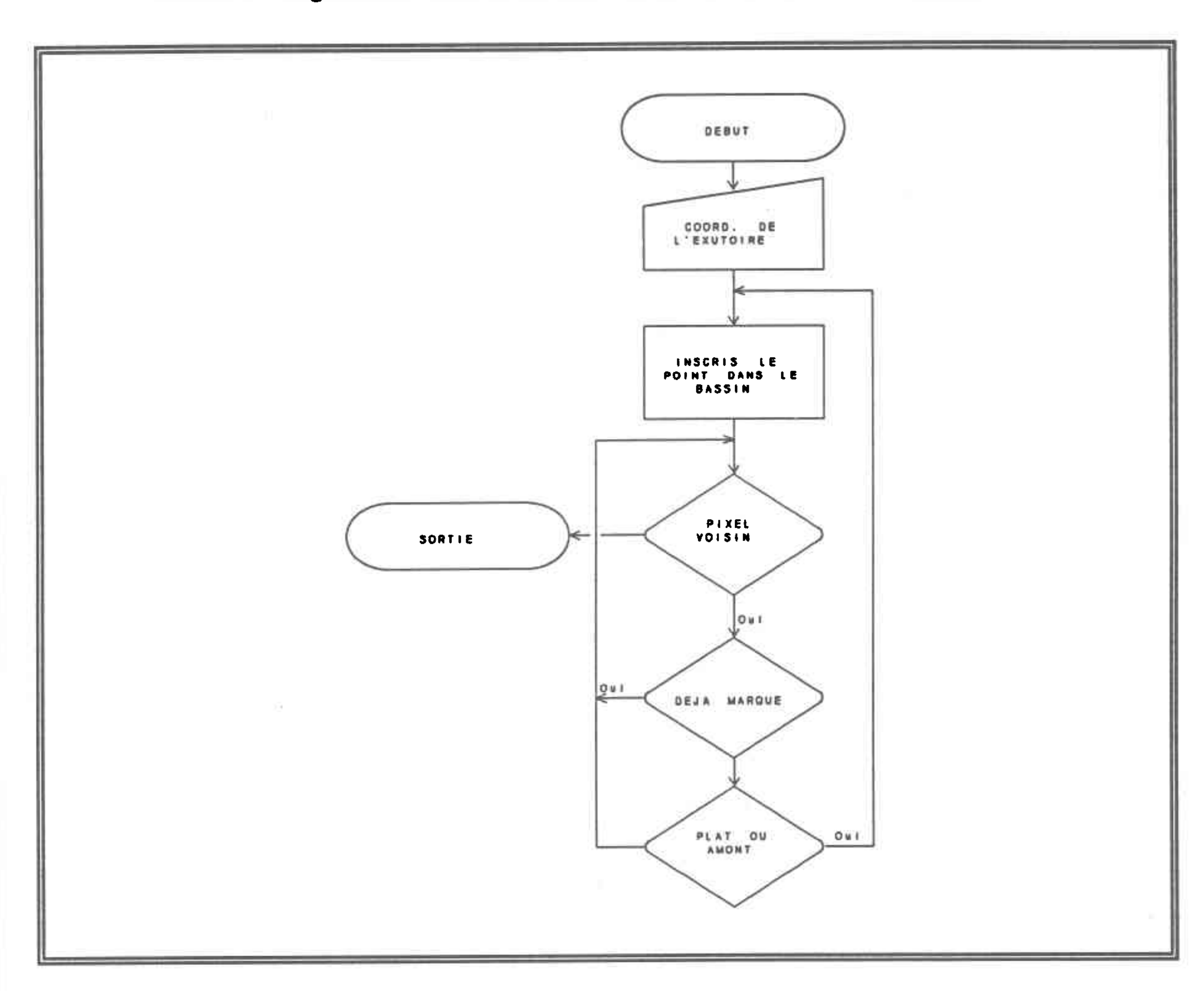
L'algorithme (figure 8) promène une fenêtre de trois rangées par trois colonnes sur la matrice des orientations des pixels et détermine récursivement les carreaux qui se jettent dans le carreau central de la fenêtre. Grosso modo, l'algorithme fonctionne de la façon suivante:

- Marque le point initial à l'intérieur du bassin.

- Vérifie séquentiellement les huit points voisins, en tenant compte des bordures et des coins de grille:

    . Si le point voisin est déjà marqué dans le bassin, ignore le et passe au voisin suivant.

FIGURE 8 Algorithme récursif de délimitation du bassin (Marks *et al.*, 1984)



. Si le point voisin est plat (pente inférieure au seuil), ou est en amont du point central (altitude plus élevée), prends ce voisin comme central et invoque la récursion de l'algorithme.

L'algorithme voyage ainsi récursivement sur la grille des orientations jusqu'à ce qu'il rencontre les limites du bassin, ou le bord de grille. Il rebrousse alors le chemin, en répétant la procédure jusqu'à ce que tout le bassin soit délimité.

Winfried *et al.* (1985) utilisèrent un MNA et un modèle hydrographique numérique pour dériver la carte des pentes en utilisant des classes de pentes définies.

Jenson (1985) propose un algorithme d'identification du réseau de drainage et de détermination de bassins versants en trois étapes, qui s'appuie sur la définition des minima
locaux (forme V) proposé par Peucker et Douglas (1975):

- La première étape consiste à identifier les concavités locales dans douze sections possibles en promenant une fenêtre de 3 x 3 sur la matrice d'un MNA, le pixel central d'une forme concave est considéré comme un carreau de drainage;

- la seconde à regrouper ces pixels en réseau de drainage et à créer des mini bassins; et

- la troisième à regrouper ces mini-bassins en bassins selon des critères de décisions basés sur les tolérances d'altitude, de parcours et de distance.

L'algorithme utilise les techniques du proche voisin et des procédures spatiales itératives. Plusieurs programmes d'application basés sur cet algorithme ont été développés par EROS Data Centre de l'U.S. Geological Survey pour faire de l'analyse de terrain et extraire l'information sur la structure et les caractéristiques topographiques à partir de MNA (Jenson and Domingue, 1988). Les programmes ont été codés en langage FORTRAN et interfacés à des logiciels vectoriels et matriciels d'analyse spatiale et des gestionnaires de bases de données relationnelles.

Perchalski (1986) a formulé plusieurs approches différentes pour l'étude de phénomènes spatiaux. La plus innovatrice et économiquement viable est basée sur l'utilisation de la télédétection pour la collecte des données et l'extraction de l'information. Perchalski utilise les données obtenues à partir de photos aériennes et de sources conventionnelles, pour déterminer la longueur et le gradient des pentes d'unités spatiales homogènes dans des calculs d'érosion des sols. La méthode qu'il a développé emploie la télédétection pour la collection des données, mais les techniques d'analyse restent essentiellement manuelles.

Rui *et al.* (1986) ont déterminé les principales formes de terrain: plateau, dépressions, cirques, monticules, cols et éléments d'érosion linéaires tels les sillons et rigoles à partir de données MSS et de MNA. La méthode préconisée est la suivante:

- calculer les modèles ombragés de relief pour deux positions du soleil, haute et basse à partir de MNA;

- appliquer des filtres différentiels de différents moments aux images ainsi obtenues et au MNA original, pour dériver la pente ou le Laplacien (moment de premier ordre) et la courbure ou le Discriminant (moment second ordre);

- calculer les deux premières valeurs propres de la matrice des dérivées secondes.

Ces filtres différentiels furent ensuite appliqués sur la première composante principale de l'image MSS. L'image composite fausse couleur obtenue par la combinaison de la première valeur propre (bleu), du laplacien (vert) et du discriminant (rouge) a permis de mettre en évidence les formes majeures du terrain.

L'inconvénient de cette méthode est que les formes ne sont pas invariantes de la position du soleil. De plus, elle ne permet de cartographier les différentes formes du terrain que de façon manuelle.

Van der Grient (1986) a développé un programme informatique récursif de traçage des contours de bassins versants à partir de MNA. L'algorithme invoque la croissance de bassin à partir du point d'échantillonnage en testant de façon itérative les altitudes de chacun des huit points voisins pour voir s'ils se déversent vers le pixel central. Le programme a été développé en FORTRAN pour des mini ordinateurs.

La présence de dépressions ou "puits" de grande étendue dans les MNA de bassins à pentes faibles et des plaines réduit la performance du logiciel.

Les travaux de Band (1986) sont ceux qui ont le plus inspiré les nôtres. Band utilise le MNA pour cartographier automatiquement l'écoulement gravitaire et identifier

les tributaires des réseaux de drainage d'un bassin versant. Les structures topographiques obtenues sont ensuite utilisées pour subdiviser le bassin en sous-bassins. L'approche proposée reprend les procédés déjà développés par Marks et Frew (1982) et Jenson (1985). Elle se base sur la théorie de traitement numérique d'image de Rosenfield et Kak (1982). La méthodologie comprend trois étapes essentielles:

- la détermination de réseaux locaux d'écoulement;

- la définition des lignes de partage des eaux; et

- le codage topologique et l'étiquetage du système de drainage.

Dans leur ouvrages subséquents, Band (1989) et Lammers et Band (1990) poussent le développement encore plus en avant vers la constitution d'une base de données objet qui associe l'information sur le terrain aux unités géomorphométriques. L'objet dans ce cas précis est l'aire comprise entre le bief d'un réseau de drainage et les lignes de partage des eaux qui y sont associées (y inclus les flancs de colline). Ils présentent une série de techniques et de programmes écrits en langage "C" pour la génération automatique d'une base de données objets d'un bassin versant. Ces "objets" peuvent, avec de légères modifications, être intégrés dans des logiciels d'analyse de terrain.

Morris et Heerdegen (1988) proposent une méthode intéressante de détermination du contour du bassin à partir du réseau de drainage qui consiste à:

- prendre le point à mi-chemin entre l'exutoire considéré et le point aval vers lequel il se déverse comme origine aval du contour;

- sonder les six positions possibles du point de contour suivant, dans le sens des aiguilles d'une montre, en commençant par celle qui est la plus proche du point de drainage amont, jusqu'à ce que celui situé entre un point inclus et un autre exclus dans le réseau de drainage soit trouvé; et

- réitérer la procédure en prenant le point trouvé comme origine jusqu'à obtenir le contour du bassin en entier.

La précision de détermination du contour du bassin par cette méthode se situe la plupart du temps à l'intérieure de la résolution spatiale du MNA.

Mentionnons aussi le système expert DNESYS ("Drainage Network Extraction System") développé en PROLOG par le "Spatial Data Analysis Laboratory" de l'Institut polytechnique et de l'Université d'État de Virginie, U.S.A. et analysé par Qian *et al.* (1990). DNESYS utilise les opérateurs locaux et les raisonnements globaux pour extraire le réseau de drainage et les lignes de crêtes à partir de MNA. DNESYS comporte pratiquement deux phases.

- La première (traitement de niveau inférieur) consiste à:

  . créer les cartes des formes du terrain (formes en V et formes en A) dans les quatre directions possibles (horizontale, verticale et diagonale);

  . identifier et enlever les cols de la carte des V;

  . amincir les formes en V à un seul pixel d'épaisseur sans tenir compte des propriétés de drainage par l'algorithme d'Arcelli et de Sanniti (1981); et

  . regrouper ces formes en réseau de drainage, et lignes de crêtes.

A ce point-ci des traitements, il subsiste évidemment des puits, des conflits dans les directions de l'écoulement et autres ambiguïtés. La résolution de la plupart de ces problèmes est réalisé en seconde phase.

- Cette seconde phase (traitement de niveau supérieur) correspond à la partie "expert" de DNESYS et comporte la base des données, la base des connaissances intuitives et les procédures d'inférence utilisées pour solutionner de façon optimale les problèmes liées à la connexion / "disconnexion" des

segments qui devraient l'être ou non, mais qui ne sont pas évidentes à l'étape antérieure.

DNESYS est efficace sous différentes conditions. Il présente aussi des caractéristiques intéressantes sur la possibilité d'entraîner et de modifier la base des connaissances, la flexibilité dans les types de raisonnements applicables à des segments, des arbres, des sous-régions spécifiques ou à toute base de données obtenues à l'issue de la première phase. De plus ses résultats peuvent être superposés au MNA original, ce qui permet de corriger les MNA en fonction de l'analyse de terrain.

C. Les modèles hydrologiques

Le développement de modèles hydrologiques déterministes a été initié au début des années soixante par le modèle Stanford (Crawford and Linsley, 1964 et 1966). Ce modèle a été suivi par plusieurs autres, tous basés sur l'utilisation des données d'entrée conventionnelles, soit les cartes thématiques et les observations météorologiques et hydrométriques (Cormary, 1969; Girard et al., 1971 et 1972; Anderson, 1973; U.S. Army Corps of Engineers, 1975; etc.).

L'utilisation de la télédétection pour la cartographie des ressources naturelles (couverture des sols, délimitation des plaines d'inondation, couverture nivale) et autres applications d'intérêt en modélisation hydrologique commencée vers la fin des années soixante (Robinove, 1969; Rango, 1975) ne prit son véritable essor que dans les années quatre vingts (Fortin et al., 1979; Séguin, 1980). Les études d'intégration véritable de la télédétection aux modèles hydrologiques sont encore plus récentes (Boley et al., 1981; Martinec, 1982; Fortin et al., 1983; etc.). Dans leur étude, Peck et al. (1981) conclurent que la plupart des modèles hydrologiques existants ne présentent pas de potentiel significatif pour utiliser les données de télédétection. La modélisation hydrologique ne peut donc être améliorée que par le développement d'une nouvelle génération de modèles - ou routines pour les modèles existants - qui prendraient en compte les capacités nouvelles des techniques de télédétection.

Les chercheurs de l'INRS-Eau ont été particulièrement actifs dans le développement de modèles matriciels caractérisés par des données d'entrée et de sortie physiographiques et des variables d'état spatialement distribuées selon un système d'information à grille carrée (Girard *et al.*, 1980; Morin *et al.*, 1981; Villeneuve et Isabel, 1984), modèles généralement plus susceptible d'accepter les données de télédétection que leurs prédécesseurs.

Le modèle HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1986) est un modèle de prévision hydrologique modulaire. C'est un modèle interactif conçu pour fonctionner sur micro-ordinateur qui intègre de plus les données de télédétection de différentes sources. Le logiciel PHYSITEL, objet de cette recherche, est un module d'HYDROTEL. La principale utilité de PHYSITEL reste de pourvoir HYDROTEL en données physiographiques nécessaires à son fonctionnement.

IV. Méthodologie de Développement du modèle

A. Originalité

La spécificité de la recherche consiste en:

- l'utilisation conjuguée d'images satellitaires du bassin versant et de MNA pour la résolution d'ambiguïtés dans le sens de l'écoulement - celles qui sont dues à la dimension des éléments de la grille du MNA (l'échelle), la qualité du MNA - qui dépend de la généralisation cartographique utilisée pour l'obtenir, des erreurs grossières incontrôlables, ou de la morphologie du terrain;

- la méthodologie de traitement des discontinuités dans le réseau de drainage et les contours des bassins et sous-bassins dues à des points singuliers (extremums locaux), à des plans d'eau et à des dépressions de grand diamètre - qui caractérisent les zones relativement planes;

- le potentiel d'utilisation du modèle pour rectifier le réseau hydrographique sur les images satellitaires et les valeurs d'altitude erronées ou non représentatives sur les MNA; et

- la capacité de traiter de grands bassins, sans restriction quant à leur relief et leurs dimensions autres que celles dues à la mémoire de stockage de l'ordinateur.

Il est difficile de faire ressortir l'originalité de nos travaux par rapport a ceux entrepris par d'autres équipes qui travaillaient simultanément au développement de logiciels similaires. Au départ, Ils se sont inspirés de ceux de l'équipe de Band (1986), qui en étaient à leurs débuts. Ils ont par la suite été menés en parallèle avec ceux de cette équipe et ceux d'autres équipes de recherches, en particulier celles de Jenson et Domingue (1988). Nous pensons aussi utile de mentionner que nous n'avions accès à aucun des logiciels, que ce soit celui de Band, qui n'a été incorporé que beaucoup plus tard au Système d'information géographique GRASS, ou celui de Jenson et Domingue qui lui est conçu pour fonctionner sur mini-ordinateur.

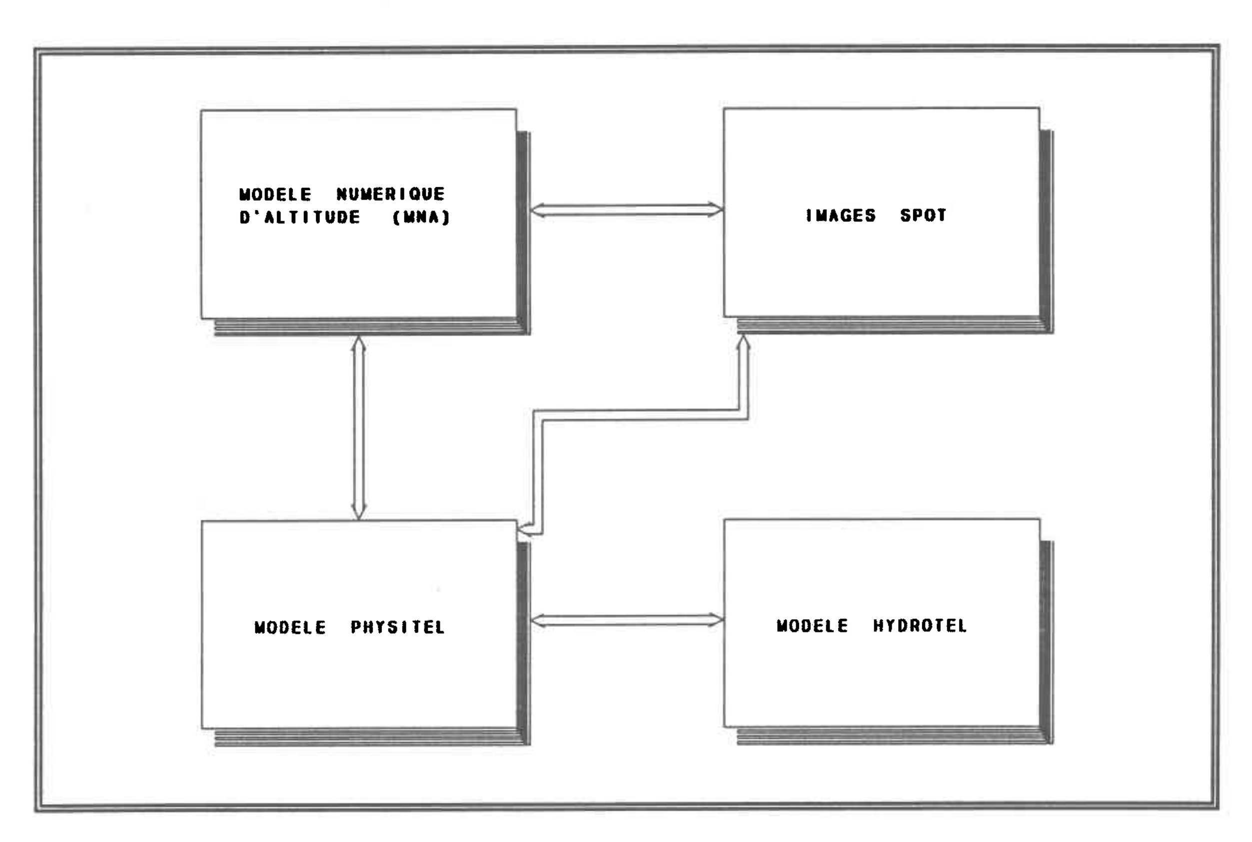
De nombreux autres travaux ont été ou sont en cours de réalisation dans le domaine de l'analyse de terrain pour des besoins d'hydrologie ou de géomorphologie. Parmi ces travaux citons: "Drainage Network Simulation" (Yuan and Vanderpool, 1986) "Determination of the execution sequence of channel flow for cascade routing in a drainage network" (Garbrecht, 1988); "Network models in geomorphology" (Mark, 1988); "Drainage Networks From Grid Digital Elevation Models" (Fairfield et Leymarie, 1991); "Catch: A Fortran Program for Measuring Catchment Area from Digital Elevation Models" (Martz et de Jong, 1988); Etude géomorphologique du bassin-versant de Booro-Borotou (Depraetere, 1989); "Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas From Digital Elevation Models" (Martz et Garbrecht, 1992); "Application of Remote Sensing and Geographic Information System in Hydrological Modelling" (Su *et al.*, 1992); "Generation of network and subwatershed parameters from digital elevation models" (Martz et Garbrecht, 1993); etc.

B. Le modèle physiographique et son environnement

Le modèle (PHYSITEL) est un outil d'analyse numérique de terrain. Son interaction avec les données de télédétection (SPOT), les modèles numériques d'altitude (MNA) et les modèles hydrologiques (HYDROTEL) est illustrée dans la figure 9.

Il y a une relation de réciprocité entre les quatre éléments du système. Le

FIGURE 9 PHYSITEL et son environnement



modèle PHYSITEL alimente le modèle hydrologique (HYDROTEL) en données physiographiques extraites de modèles numériques d'altitude (MNA), eux-mêmes, dérivés d'images satellitaires (SPOT). Réciproquement, les résultats d'HYDROTEL peuvent servir à améliorer les fonctions de PHYSITEL qui, à son tour, peut être utilisé pour corriger le MNA et améliorer certaines caractéristiques physiques de l'image (réseau hydrographique, orientations des pentes, couverture des sols). Les propriétés

physiques du terrain extraites du MNA renferment des ambiguïtés que l'image SPOT peut aider à résoudre.

Le modèle physiographique est donc polyvalent. Il permet d'obtenir les caractéristiques physiques du terrain à partir du MNA, d'alimenter les modèles hydrologiques en données physiques, de corriger le MNA et d'améliorer l'image satellitaire.

C. Méthodologie

Les caractéristiques physiques du terrain les plus demandées sont les altitudes, les pentes et les formes. Les altitudes, ou tout au moins un échantillon représentatif, sont explicitement contenues dans les MNA, ce sont ses valeurs numériques. Les pentes y sont implicitement contenues, elles sont directement dérivables à partir de ces MNA. Les formes, quant à elles, nécessitent une analyse beaucoup plus élaborée pour être extraites des MNA. L'organigramme de la figure 10 aide à poser plus clairement le problème à résoudre par PHYSITEL. Il peut être formulé de la façon suivante: connaissant les coordonnées de la position d'un exutoire quelconque, il s'agit de trouver la partie du bassin versant qui draine vers cet exutoire, de dériver les caractéristiques physiques de ce bassin et de les présenter sous forme assimilable par HYDROTEL. Les données d'entrée du modèle sont donc le MNA et les coordonnées de l'exutoire, les données de sortie - le masque du bassin, le réseau de drainage, les pentes, l'orientation des pentes et certaines formes de terrain telles les puits, les plateaux, et les dépressions.

La méthodologie préconisée pour résoudre le problème comporte six étapes distinctes:

- La première étape consiste à obtenir, à partir du MNA source, un MNA de format compatible. Le format des MNA n'est pas standard, il varie selon sa source d'obtention. Nous avons développé un programme qui transfère le MNA créé sur mini-ordinateur pour être lu par le système ARIES III de Dipix au format

utilisé sur micro-ordinateur par le modèle PHYSITEL. Cette fonction n'est pas illustrée dans la figure 10.

- La seconde, à contrôler et pré-traiter le MNA, pour enlever les erreurs grossières. Cette étape est nécessaire parce qu'il est indispensable de supprimer les erreurs grossières de généralisation cartographique du MNA et autres. Nous obtenons un MNA bien conditionné comme résultat de cette étape.

- La troisième, à produire des données d'information intermédiaires soit un modèle des pentes brutes qui comporte trois paramètres: angles, longueurs et orientations des pentes dans un référentiel spatial donné.

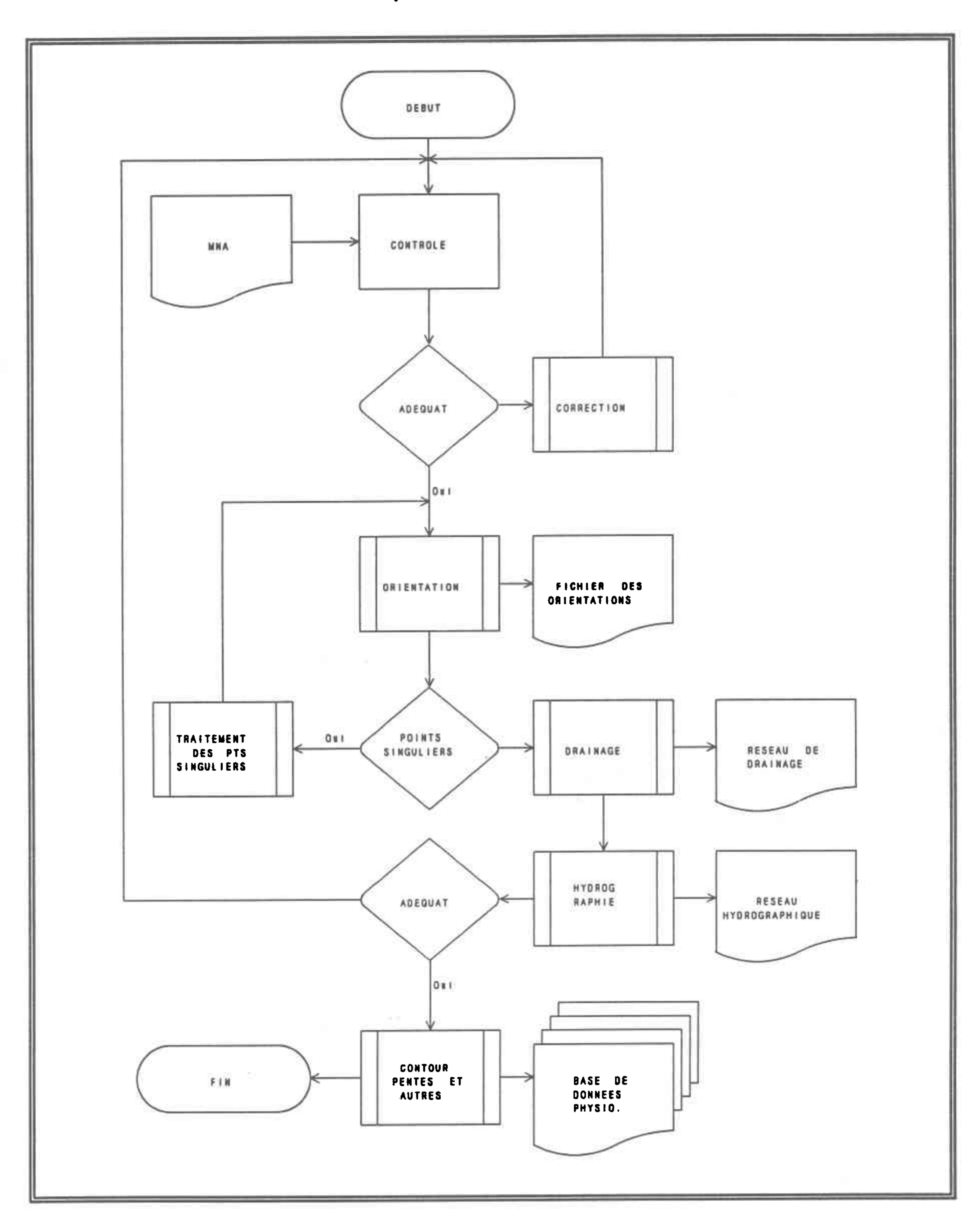
- La quatrième, à identifier les formes locales singulières isolés de dimension d'un seul carreau et à leur correction. Ceci permet de supprimer les discontinuités qui sont dues aux carreaux plats isolés dans le réseau de drainage. Cette étape contiendra un procédé automatique de résolution des discontinuités et offrira aussi l'alternative de correction manuelle de celles qui ne sont pas résolues de façon automatique.

- La cinquième, à identifier les plateaux et les dépressions et à les déverser vers un exutoire artificiellement choisi, si nécessaire, selon des critères logiques de continuité du drainage.

- La sixième, à délimiter le contour du bassin, tracer le réseau de drainage, calculer le drainage cumulé de chacun des carreaux du réseau, et créer la base de données des caractéristiques physiques du bassin et les fichiers de données compatibles au modèle HYDROTEL.

La conception du modèle et le développement de programmes pour exécuter ces opérations constituent le principal contenu de cette recherche. Ces programmes seront décrits en détail dans le texte qui suit.

FIGURE 10 PHYSITEL: Méthodologie de détermination des paramètres physiques d'un bassin versant à partir d'un MNA



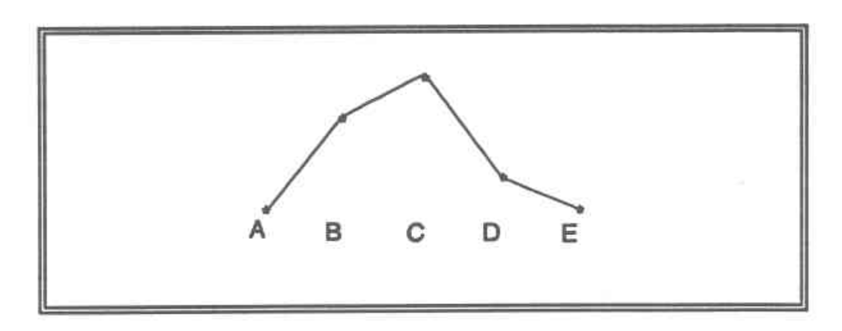
1. Contrôle et amélioration du MNA

Les MNA produits par des méthodes de corrélation d'images stéréoscopiques contiennent inévitablement des erreurs grossières dans les altitudes du terrain. Ces erreurs résultent la plupart du temps de la confusion du corrélateur dans la localisation des aires correspondantes sur les deux images. Ce problème peut être dû au bruit du balayeur, aux contrastes peu élevés dans les images, à la texture du terrain, et parfois même à des distorsions induites directement par le relief. Plusieurs algorithmes plus ou moins efficaces, dont celui décrit par Hannah (1979 et 1981), ont été développés pour détecter, localiser et corriger ces valeurs erronées d'altitude des MNA.

La méthodologie proposée par Hannah est applicables à des MNA à grilles régulières. Elle est basée sur les contraintes de terrain, notamment les contraintes locales de pentes et de changement de pentes. Ces contraintes s'appuient sur la définition de seuils délimitant les valeurs raisonnables de pentes ou de changements de pente.

Dans une première étape, l'algorithme calcule les changement de pente pour chaque point du MNA dans la direction de ses huit voisins. Ensuite, Il compare ces valeurs au seuil. Le changement de pente perd sa crédibilité, à chaque fois qu'il dépasse le seuil fixé (dans le sens positif ou négatif). Ce procédé établit les changements de pente acceptables dans le MNA. Le procédé similaire est appliqué aux pentes pour établir la gamme de pentes acceptables dans le MNA. Douze tests sont appliqués à chaque point du MNA - quatre avec les voisins immédiats et huit avec les voisins suivants, la figure 11 illustre bien le procédé appliqué aux pentes.

FIGURE 11 Contrainte des pentes dans une direction (Hannah, 1979)



Dans cet exemple, le point central est soumis à trois tests:

- Le premier, avec les voisins immédiats, consiste à comparer la pente BC avec la pente CD. Dans ce cas, les pentes différent significativement, le point C devrait donc être abaissé.

- Les deux suivants, avec les voisins suivants, consistent à comparer les pentes de CD avec DE, puis de CB avec BA. Dans ce cas, les paires de pentes sont plus cohérentes - même que A et B suggèrent que C devrait être élevé, alors que D et E suggéreraient que C devrait être abaissé.

Ces trois tests sont répétés dans les quatres directions possibles (Nord-Sud, Est-Ouest, et les deux diagonales). Trois situations sont possibles: abaisser (si la pente est supérieur au seuil), élever (si elle se situe au dessous de la valeur du seuil prise négativement), laisser inchangé (si elle se situe à l'intérieur du seuil). La décision de modifier l'altitude du point se fait au suffrage basée sur le nombre de fois que chacune des situations se présente.

Après que les points litigieux aient été localisés, un autre algorithme se charge d'en corriger l'altitude. Cet algorithme utilise les techniques statistiques et les techniques de relaxation pour obtenir les meilleurs résultats. Bien qu'elle donne de bons résultats, cette méthode présente l'inconvénient de lisser exagérément le relief.

De nombreux autres algorithmes ont été développés pour détecter et corriger ces erreurs. Ces algorithmes sont souvent intégrés directement dans les techniques

de production des MNA. Les erreurs qui échappent à ces algorithmes de correction des MNA sont les points extremums. Ces extremums peuvent être des formes réelles du terrain (lacs, dépressions, monticules) ou des erreurs dans les données. Ces erreurs peuvent être de trois types:

- des valeurs erronées induites par la perte d'information, résultat de la numérisation des données continues en données discrètes;

- des erreurs du modèle d'interpolation utilisé; et

- des erreurs de manipulation des données durant le processus de création du MNA.

Ces erreurs peuvent interférer avec des formes réelles de terrain et créer des discontinuités dans le réseau de drainage. Aussi, faudrait-il les localiser et les corriger, avant d'utiliser les MNA. Deux méthodes seront utilisées pour éliminer ces erreurs:

- La première consiste à localiser et à supprimer automatiquement les extremums de dimension d'un carreau.

- La seconde, à filtrer le MNA, le résultat étant un adoucissement du relief du terrain sans en modifier la configuration.

L'algorithme développé pour contrôler le MNA exécute, selon les besoins, une ou plusieurs des opérations suivantes:

- affiche à l'écran, en tout ou en partie, le fichier du MNA sous forme alphanumérique;

- localise les puits et les sommets et élimine ceux dont la dimension est d'un carreau; et

- filtre le MNA avec un filtre pondéré de 3 carreaux x 3 carreaux de dimensions.

Les extremums sont localisés en déplaçant un noyau de 3x3 sur le MNA. Lorsqu'un extremum est rencontré, son altitude est remplacée par la valeur médiane du noyau. Cette opération est, en général, suffisante pour supprimer la plupart des extremums dues aux erreurs grossières du MNA. Il est à noter que la technique de correction que nous avons utilisée supprime systématiquement les extremums de un carreau de dimension et non seulement les valeurs anormales. La discrimination des valeurs anormales et des valeurs réelles des extremums amélioreraient la validité des résultats. Cet aspect n'a cependant pas fait l'objet d'étude particulière dans le cadre de ce travail. Il pourrait être étudié lors de développements ultérieurs du modèle.

Le MNA résultant de la correction des extremums peut ensuite être filtré, si nécessaire, par un filtre de 3x3 représentant la moyenne mobile pondérée. Cette opération additionnelle devrait, en théorie, supprimer toutes les erreurs grossières encore présentes dans le MNA après la correction des extremums. O'Callaghan et Mark (1984) notèrent que le filtrage des MNA permet d'enlever un grand nombre de points singuliers (puits et sommets), mais produit l'effet adverse d'adoucissement exagéré de la topographie, entraînant une perte significative d'information. Band (1986) et tous les autres chercheurs qui travaillent dans le domaine partagent cette opinion.

Pour éviter donc une grosse perte d'information, nous suggérons d'utiliser un filtre fortement centré. Une façon pour ce faire est d'allouer un poids élevé au carreau central du filtre (figure 12). Selon les caractéristiques propres à chaque type de bassin étudié (plat, légèrement ou fortement accidenté) différents filtres sont envisageables. La fonction de filtrage que nous avons développée utilise la contribution du carreau considéré et celles de ses huit voisins, les poids attribués à ces contributions sont calculés de la façon suivante:

FIGURE 12 Pondération du filtrage

0,07	0,05	0,07
0,05	0,5	0,05
0,07	0,05	0,07

$$P_0 = P_{ij} = 0.5$$
$$P_4 = P_{i,j\pm1} = P_{i\pm1,j} = 1/4\ (0.5 \div (1 + 2^{1/2}) \times 2\tfrac{1}{2}) \quad \text{[i différent de j]}$$
$$P_8 = P_{i\pm1,j\pm1} = 1/4\ (0.5 \div (1 + 2^{1/2}))$$

$$Hf_{ij} = H_{ij} \times P_0 + (H_{i,j-1} + H_{i,j+1} + H_{i-1,j} + H_{i+1,j}) \times P_4 + (H_{i-1,j-1} + H_{i-1,j+1} + H_{i+1,j-1} + H_{i+1,j+1}) \times P_8$$

Il est cependant à noter que cette fonction de pondération ne s'applique qu'à des MNA à grille régulière carrée.

Quand le MNA source est de qualité acceptable, le MNA corrigé pour les extremums et filtré devrait être dépourvu de toute erreur. Autrement, il est toujours possible de répéter les opérations de correction des extremums et de filtrage jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucun point singulier. le programme offre d'ailleurs l'option d'exécuter plusieurs itérations sur simple commande.

2. Détermination des données intermédiaires

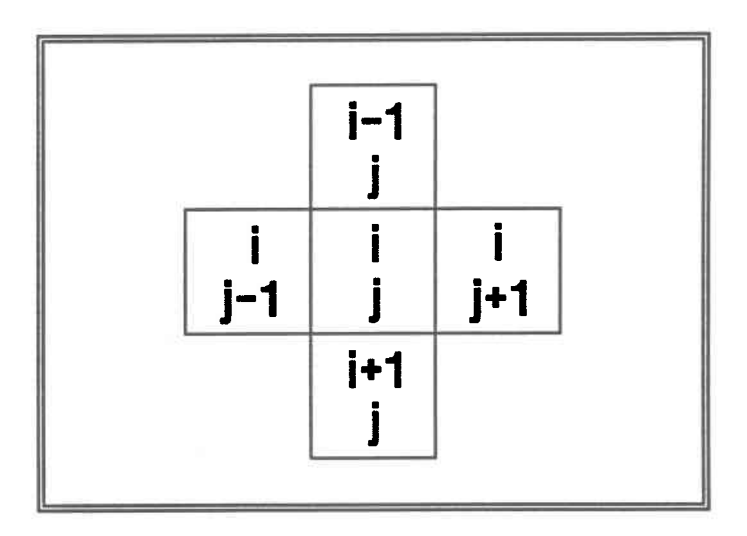
Les données intermédiaires qui seront d'utilité aux traitements subséquents sont la pente et l'orientation des carreaux. Il existe au moins trois méthodes connues de

détermination des pentes et des orientations des carreaux à partir de données numériques discrètes. Les deux premières sont basées sur la définition du MNA comme représentant le terrain dans le domaine spatial. La plus simple procède au calcul de huit valeurs de pentes comme rapport de la dénivelée entre l'altitude du carreau central du noyau et celles de ses huit voisins. Ces valeurs sont ensuite comparées et la plus élevé est considérée comme la pente du carreau. La seconde méthode est la pente vectorielle. Dans ce cas, on assume la continuité du terrain et la pente du carreau est calculée à partir de son vecteur normal (Ritter, 1987). La troisième méthode est basée sur la représentation du terrain par des fréquences spatiales, elle utilise la transformée bidimensionnelle de Fourier (Papo, 1984). Dans ce cas-ci, on calcule les transformées de Fourier (directe et inverse) du domaine spatial au domaine des fréquences, et ensuite la pente est obtenue à partir des dérivées analytiques de premier ordre. Ritter (1987) considère, que malgré la perte de précision due au fait que l'on ne prend pas en compte les carreaux diagonaux voisins pour le calcul des pentes et des orientations, la méthode vectorielle constitue un compromis acceptable entre la précision et la complexité des calculs et elle reste plus précise que celle qui donne la pente à l'aide de deux carreaux seulement. C'est pour cela que nous préconisons l'utilisation de la méthode vectorielle, appelée aussi méthode des différences finies pour la détermination des paramètres de pentes dans le modèle PHYSITEL.

a. Détermination des pentes

Partant de l'hypothèse que la surface topographique est continue, la pente des carreaux peut être calculée par la racine carrée de la somme des carrées des dérivées partielles des altitudes des quatre carreaux voisins dans la direction des axes de coordonnées X, et Y (figure 13). Par commodité et pour économiser de l'espace mémoire, nous exprimerons la pente en millièmes ($^{0}/_{00}$).

FIGURE 13 Fenêtre pour le calcul des pentes



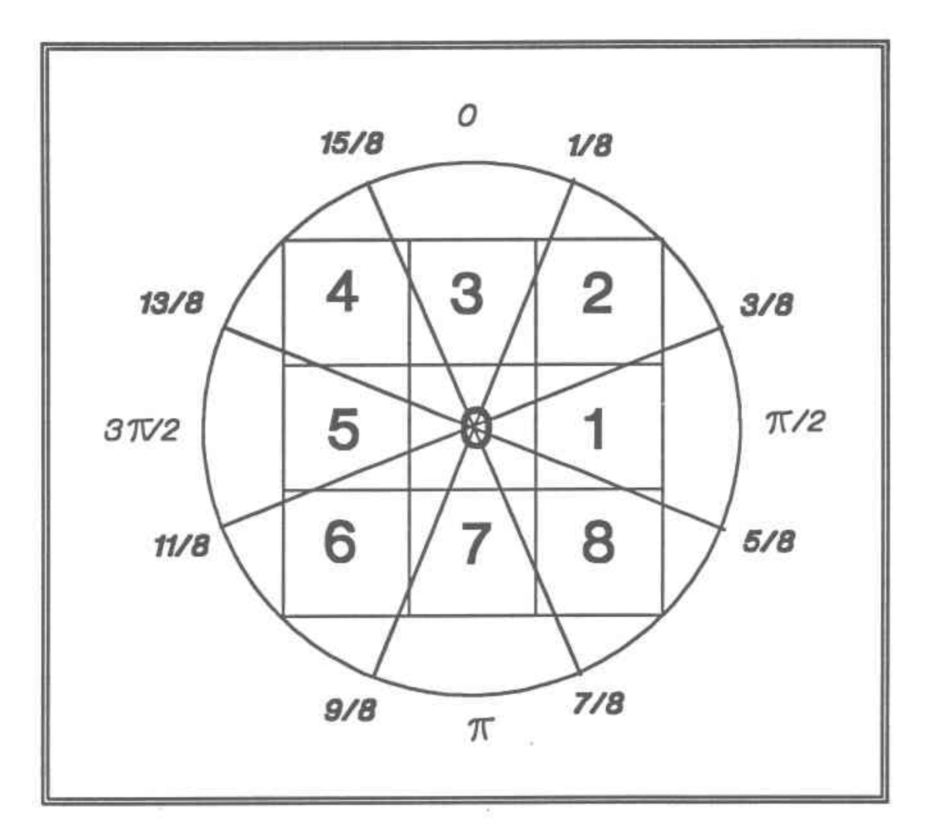
Pt_{ij} ($^{0}/_{00}$) = $1000\ ((\delta Hx/\delta X)^2 + (\delta Hy/\delta Y)^2))^{1/2}$
où $\delta Hx = H_{i,j-1} - H_{i,j+1}$
$\delta Hy = H_{i+1,j} - H_{i-1,j}$
$\delta X = X_{i,j+1} - X_{i,j-1}$
$\delta Y = Y_{i+1,j} - X_{i-1,j}$
[$Pt_{ij} = 0$ Si $\delta Hx = \delta Hy = 0$]

où Pt_{ij} est la pente du carreau
H est l'altitude
X et Y sont les coordonnées planimétriques

b. Détermination des orientations

L'orientation des carreaux joue un rôle prépondérant dans l'écoulement gravitaire de l'eau. C'est grâce à ces orientations qu'il devient possible de déterminer la ligne de partage des eaux et de définir tout le réseau de drainage. La fonction "ORIENTE" permet de déterminer l'orientation dans 8 sens possibles qui sont codés dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (figure 14), de la manière suivante: 0, plat; 1, est; 2, nord-est; 3, nord; 4, nord-ouest; 5, ouest; 6, sud-ouest; 7, sud; et 8, sud-est.

FIGURE 14 Codes des orientations des pentes



Ce système de codage a l'avantage que les sens opposés diffèrent du facteur 4, cette particularité est utilisée dans le processus de programmation.

Nous avons utilisé deux méthodes de détermination des orientations. La première consiste à déterminer l'orientation à l'aide de la projection du vecteur normal du carreau sur le plan horizontal.

Si $\delta Hx = 0$ et $\delta Hy = 0$:
$S = 0$ (carreau plat)
Si $\delta Hx = 0$: le carreau est orienté dans la direction de l'axe des Y (Nord si $\delta Hy > 0$, Sud si $\delta Hy < 0$
Autrement:
$S = \text{atan2}(\delta Hy + \delta Hx)$

où $\delta Hx = H_{i,j-1} - H_{i,j+1}$
$\delta Hy = H_{i+1,j} - H_{i-1,j}$

atan2 calcule la tangente et retourne une valeur comprise entre $-\pi$ et π

Comme le drainage est définie dans 8 sens seulement, l'orientation est réduite et codée à 8 valeurs seulement comme suit:

0 carreau plat
3 nord $[15\pi/8\ \pi/8[$
2 nord-est $[\pi/8\ 3\pi/8[$
1 est $[3\pi/8\ 5\pi/8[$
8 sud-est $[5\pi/8\ 7\pi/8[$
7 sud $[7\pi/8\ 9\pi/8[$
6 sud-ouest $[9\pi/8\ 11\pi/8[$
5 ouest $[11\pi/8\ 13\pi/8[$
4 nord-ouest $[13\pi/8\ 15\pi/8[$

La borne de droite est incluse; celle de gauche exclue.

La seconde méthode n'est appliquée que si à la suite de l'application de la première le carreau s'avère plat alors qu'il existe une dénivelé par rapport aux carreaux diagonaux voisins. Elle consiste alors à l'orienter vers celui de ces voisins qui accuse la dénivelée la plus forte.

Les données sur les pentes et les orientations sont en général suffisantes comme données d'entrée pour le traçage automatique du contour du bassin versant dans le cas de bassins moyennement ou fortement accidentés. Dans les zones du bassin où le relief est bas, les étendues planes tels les plateaux et les plaines peuvent causer des ambiguïtés dans la direction de l'écoulement de l'eau, et faire que l'algorithme de délimitation du bassin ne fonctionne pas correctement. Aussi, ces zones planes doivent être localisées et traitées en relation avec les formes de terrain qui les entourent, et le patron de drainage défini pour chacun des carreaux de ces zones.

3. Détermination des contours du bassin et du réseau de drainage

L'algorithme de délimitation du bassin est un algorithme récursif qui utilise le fichier des orientations comme fichier d'entrée et produit le contour du bassin pour chacun des exutoires, en données en sortie. L'algorithme commence par inscrire l'exutoire dans le bassin, ensuite il considère successivement et itérativement chacun des huit carreaux connectés qui l'entourent. Si le carreau considéré est orienté vers le carreau central, et s'il n'est pas inscrit dans le bassin, l'algorithme se déplace vers ce carreau comme carreau central et répète la procédure jusqu'à ce que les bordures du MNA sont atteintes ou que les huit carreaux voisins aient été considérés. L'algorithme retient en mémoire le chemin parcouru et inscrit sur le fichier du réseau de drainage, lorsqu'il rebrousse le chemin. Le processus est répété jusqu'à ce que le noyau retourne à son point de départ et que les huit voisins ont été visités deux fois (aller-retour).

Cette méthode de délimitation du bassin versant est une approche par écoulement. Elle a l'avantage de simuler le processus hydrologique réel bien que l'écoulement soit restitué d'aval en amont plutôt que d'amont en aval et elle a le potentiel de contribuer à notre compréhension des relations entre la topographie, le ruissellement, les sources du drainage et la structure du réseau de drainage (Mark, 1983).

4. Drainage des zones planes

Les terrains de pente inférieure à un seuil fixé par l'utilisateur sont considérés comme plats et leurs pentes mises à zéro. Bien qu'il n'y ait pas alors de pente ni d'orientation pour définir l'écoulement de ces zones, il faudrait trouver un exutoire pour ces terrains, créer un écoulement artificiel, et les vider vers le carreau le plus bas qui se trouve en bordure du plateau. Selon la position de ces terrains plusieurs situations peuvent se présenter.

a. Terrain plat à l'intérieur du bassin

Si les carreaux plats isolés à l'intérieur du bassin ne sont pas des fonds de dépressions, leurs orientations sont changées de façon à ce qu'ils drainent vers les carreaux voisins les plus bas. Dans le cas où le terrain plat s'étend sur plusieurs carreaux, on explore ceux situés en bordure du terrain pour trouver un exutoire, ensuite on génère un réseau de drainage fictif vers cet exutoire, qui est à son tour vidé vers le carreau voisin le plus bas situé à l'extérieur du terrain.

b. Terrain plat adjacent au bassin

Les carreaux isolés sont drainés vers le bassin adjacent qui possède le carreau le plus bas. Lorsque le terrain recouvre plusieurs carreaux, un système décisionnel doit être élaboré. Au moins deux méthodes sont connues et couramment utilisées: la première consiste à vider le terrain plat vers le premier carreau non plat rencontré et qui se déverse hors de la dépression; et la seconde serait de le vider dans le bassin adjacent le plus bas.

Bien que les deux méthodes citées résolvent souvent le problème, elles ne traduisent pas fidèlement la réalité physique du drainage gravitaire. La méthode de remplissage croissant parait être plus raisonnable comme solution. Elle consiste à occuper le terrain plat par croissance spatiale des bassins adjacents jusqu'à ce que le terrain soit entièrement utilisée. Le déversement du terrain plat doit respecter certaines règles. Le déversement doit se faire selon le cas et dans cet ordre: (1) vers le carreau voisin le plus bas qui ne s'écoule pas dans le terrain plat; (2) le bassin voisin qui a la plus grande surface de contact avec ce terrain; et (3) le premier carreau rencontré par l'algorithme de délimitation des bassins. Dans le dernier cas, il faudra aussi changer le sens de la pente du carreau pour qu'il ne se jette pas dans le terrain plat traité.

5. Drainage des dépressions

Une fois le problème des terrains plats résolu, il reste à s'occuper du cas des dépressions fermées. Nous rappelons que nous avons défini une dépression comme une aire de plus ou moins grande étendue avec un fond mais pas de déversoir ponctuel vers l'extérieur. Le fond de la dépression peut évidemment recouvrir plusieurs carreaux connectés. De telles formes de terrain sont des plans d'eau, des cirques ou des cuvettes. Elles ne causent pas de discontinuités dans la délimitation du bassin dans la mesure où elles ne le traversent pas d'une extrémité à l'autre. Mais elles ne contribueraient pas à la structure du réseau de drainage et au bilan d'écoulement dans le bassin, si elles n'étaient traitées d'une quelconque manière. Dans le cas contraire, le réseau de drainage du bassin est discontinué et le bassin scindé en deux ou plusieurs faux bassins. Ces formes de terrain nous les avons traitées de la façon suivante: (1) nous les avons localisées sur le MNA; (2) leur avons trouvé un exutoire en inversant le sens de l'écoulement de l'eau; et (3) vidé vers le bassin voisin. L'algorithme qui exécute ces opérations est similaire à celui qui traite les terrains plats, à quelques détails près.

Comme résultat du processus de traitement des terrains plats et des dépressions nous sommes supposé obtenir un réseau de drainage continu sur l'ensemble du territoire étudié. Bien que les méthodes de traitement décrites ci-dessus conditionnent grandement le bassin étudié dans la plupart des cas pour les études des phénomènes spatiaux, elles nécessitent encore beaucoup de développement pour atteindre un efficacité totale.

6. Contour du bassin et réseau de drainage

L'algorithme développé pour délimiter le contour des bassins et des sous bassins est un algorithme de type local, ce qui veut dire que lorsqu'il est centralisé sur un carreau il ne voit que les huit carreaux directement adjacents. Il est récursif et fonctionne dans le sens aval-amont. Le principe de son fonctionnement est simple, efficace et particulièrement adapté à notre conception de l'écoulement gravitaire. L'algorithme commence le traitement à partir de l'exutoire qui pourrait être une station

de jaugeage ou tout autre point du bassin. Il inscrit le pixel dans une base des données des attributs du bassin. Il lit les attributs des huit carreaux voisins et il se déplace successivement de haut en bas et de gauche à droite sur ceux de ces pixels qui s'écoulent vers le carreau central. Lorsqu'il n'en trouve pas, il rebrousse chemin et, en même temps, il inscrit le drainage cumulé pour chacun des carreaux dans la base de données des attributs. Ce cycle est répété jusqu'à ce qu'il revienne au pixel de départ après avoir visité tous ses huit-voisins deux fois (aller et retour). Après avoir déterminé la structure du réseau de drainage, il crée le masque du bassin en initialisant à zéro l'attribut "bassin" des carreaux qui sont à l'extérieur du bassin dans la base de données.

Pour le moment, c'est l'utilisateur qui introduit directement par le clavier ou dans un fichier les coordonnées spatiales de l'exutoire du bassin à étudier. Cependant, comme dans le cas des terrains plats et des dépressions, une procédure qui le trouverait automatiquement pourrait être développée dans une étape ultérieure du développement du modèle.

D. Description des composantes du logiciel PHYSITEL

Dans le modèle, le terme logiciel désigne l'ensemble des programmes assemblés en un tout fonctionnel, les programmes eux-mêmes sont composés de fonctions. La fonction désigne un ensemble d'instructions qui ont pour objet de résoudre un problème donné. Cette organisation du modèle sous forme modulaire permet d'une part de rendre les programmes plus faciles à comprendre à déchiffrer, à structurer et à modifier; d'autre part, les fonctions plus facile à transporter d'un programme à l'autre sans modification majeure. Pour l'utilisateur non-programmeur, le programme pourrait être assimilé à une boîte noire qui effectue un certain nombre d'opérations et à laquelle on peut faire appel sans vraiment se soucier de la manière dont les opérations sont effectuées. Nous distinguons d'autre part deux types de fonctions: les fonctions principales qui traitent des problèmes fondamentaux et les fonctions auxiliaires qui exécutent des opérations de routine et plus particulièrement les opérations itératives.

1. Les fichiers

a. Les fichiers d'entrée/sortie

Si on exclut les fichiers temporaires qui sont créés pour les besoins de calcul uniquement et effacés au fur et à mesure de leur utilisation, les fichiers principaux de PHYSITEL sont:

- le fichier source des altitudes (MNA original);
- le fichier des altitudes corrigées;
- le fichier des altitudes filtrées;
- le fichier des pentes;
- le fichier des orientations;
- le fichier des puits;
- le fichier des sommets (maximums);
- le fichier des fonds (minimums);
- le fichier du masque du bassin;
- le fichier du réseau de drainage;
- le fichier des plateaux;
- le fichier des dépressions;
- le fichier des exutoires des plateaux et des dépressions; et

- le fichier de la base de données des attributs des pixels.

Nous ne décrirons que les fichiers des attributs importants du terrain.

b. Le fichier des altitudes

Le fichier des altitudes est une matrice constituée par une série de nombres entiers représentant l'altitude des points. L'unité spatiale de base est le carreau dont les cotés (largeur et hauteur) sont définies par l'utilisateur. Pour pouvoir lire la matrice correctement, Il est nécessaire de connaître le nombre de colonnes qu'elle contient. Cette organisation des données est propre aux MNA de terrain obtenus à partir des données du satellite SPOT. Comme les points se situent sur une grille régulière, le modèle est facile à référencer dans un système de coordonnées cartésien si on connaît les coordonnées de n'importe lequel de ses points (généralement celles du coin Nord-Ouest). A l'étape actuelle de développement du modèle, le fichier des altitudes est l'unique source de données externes au programme. Il sert de base à tous les traitements développés. C'est un fichier d'entiers de 16 bits correspondant à la structure des données du MS DOS.

c. Le fichier des altitudes corrigées

En général, les MNA à grille régulière contiennent beaucoup de points extremums qui sont des minimums ou des maximums locaux. Ces points singuliers peuvent introduire la discontinuité dans le réseau de drainage et la confusion dans la délimitation du contour du bassin. Ces extremums sont malheureusement nombreux non seulement dans les MNA de qualité médiocre, mais aussi dans les MNA des terrains peu ou pas accidentés. L'alignement de ces extremums sur les valeurs les plus proches voisines suppriment les extremums isolés. Le fichier ainsi obtenu est le fichier des altitudes corrigées. Sa structure est similaire à celle du fichier source.

d. Le fichier des altitudes filtrées

Le filtrage du modèle par un filtre approprié peut aussi réduire considérablement le nombre de points singuliers, par lissage des formes, sans trop nuire à l'intégrité du système physique du terrain. Le fichier des altitudes filtrées est le produit du fichier des altitudes auquel est appliquée la fonction filtre. Il est organisé de façon similaire, mais contient deux colonnes et deux rangées en moins, soit la première et la dernière colonne ainsi que la première et la dernière ligne. Ces lignes et ces colonnes correspondent au pourtour de la matrice auquel le filtre ne peut pas s'appliquer. L'alternative serait de conserver ces valeurs périphériques inchangées. Dans ce cas le fichier aurait les mêmes dimensions que le fichier source.

e. Le fichier des pentes

Le fichier des pentes est le produit du fichier des altitudes ou celui des altitudes filtrées, selon le cas, traité par la fonction tangente. Les valeurs qui le composent quantifient la pente du carreau considéré. L'organisation du fichier est la même que celle des fichiers déjà décrits plus haut avec encore deux colonnes et deux rangées en moins par rapport au fichier d'entrée: la première et la dernière colonnes ainsi que la première et la dernière lignes.

f. Le fichier des orientations

Le fichier des orientations résulte de l'application de la fonction "oriente" au MNA des altitudes d'entrée (filtrées ou non). Les données du fichier sont des nombres entiers de zéro à huit correspondant à l'orientation de la pente du carreau dans les huit directions permises. Il contient autant d'éléments (lignes et colonnes) que le fichier des pentes.

g. Le fichier des puits

Nous rappelons que le terme "puits" désigne un minimum local. Un carreau est considéré comme un puits quand son altitude est inférieure à celle de ses huit voisins. Le fichier des puits contient donc la liste des minimums locaux triés par ordre d'altitudes croissantes. A chacun des points sont associées trois valeurs: les coordonnées spatiales et l'altitude du carreau en décimètres. Ces nombres sont des entiers.

L'organisation du fichier des puits est différente de celles des fichiers décrits précédemment. Elle est de type vectoriel, chacun de ses éléments étant directement référencé par ses trois coordonnées spatiales. Cette organisation permet d'économiser de l'espace dans la mémoire de stockage, vu qu'il est extrêmement rare que le nombre de puits dépasse les 5% du nombre total d'éléments du MNA. Le fichier des puits est obtenu par les traitements du fichiers des altitudes (filtrées ou non) et du fichier des orientations à l'aide des fonctions "LOCPUIT" et "TRIPUIT".

h. Le fichier du masque du bassin

Le fichier du masque du bassin est un fichier d'entiers dont les valeurs sont égales a zéro ou un selon que le carreau considéré est situé à l'extérieur ou à l'intérieur du bassin respectivement. Son organisation est identique à celle du fichier des orientations. Le fichier du masque du bassin est obtenu par l'utilisation des fonctions "DRAINAGE" sur la base de données des attributs des pixels.

i. Le fichier du réseau de drainage

Ce fichier est obtenu simultanément au fichier du masque du bassin. Il constitue le produit le plus élaboré du modèle physiographique et le plus utile pour des applications hydrologiques. C'est un fichier d'entiers qui quantifient la contribution cumulée du carreau considéré et des carreaux en amont qui s'y drainent au réseau de

drainage. Il est organisé de façon similaire au fichier des orientations et contient autant d'éléments (rangées et de colonnes).

j. Le fichier de la base de données

Le fichier de la base de données renferme tous les attributs relatifs à la physiographie du terrain considéré utiles pour la simulation hydrologique. Pour le moment, il est limité à cinq attributs:

- les altitudes;
- les pentes;
- les orientations;
- le masque du bassin;
- le réseau de drainage.

Toutefois, il pourrait sans modification majeure, s'étendre à d'autres attributs en fonction des applications. La structure de ce fichier est de type objet où tous les attributs des pixels sont placés l'un à la suite de l'autre. Cette organisation est particulièrement efficace lorsque des algorithmes opérationnels nécessitent plus d'une strate (plan) de données pour fonctionner (drainage, dépression, etc.). C'est un fichier qui contient indifféremment des données caractères des nombres entiers et des nombres réels. C'est d'ailleurs pour cela qu'il a fallu développer des programmes utilitaires pour extraire séparément les attributs désirés.

k. Les autres fichiers

- le fichier des altitudes corrigées contient les altitude corrigées pour les extremums.

- le fichier des plateaux contient les coordonnées des coins Nord-Ouest (supérieur gauche) et Sud-Est (inférieur droit) des plateaux, leurs superficies, ainsi que les coordonnées des déversoirs.

- le fichier des dépressions contient les coordonnées des coins Nord-Ouest et Sud-Est des dépressions, leurs superficies, ainsi que les coordonnées de leurs exutoires respectifs.

Les deux derniers fichiers sont de type ASCII et peuvent donc être affichés ou imprimés simplement par les commandes du DOS.

2. Les constantes et les variables

Les constantes et les variables externes introduites par l'utilisateur sont les suivantes:

- nombre de colonnes;
- dimensions des carreaux (en X et en Y);
- seuil de pente; et
- coordonnées UTM de l'exutoire.

a. Nombre de colonnes

Comme nous l'avons déjà expliqué, les valeurs d'altitude des MNA sont enregistrées séquentiellement sur les différents fichiers matriciels sans aucun séparateur, l'utilisateur est donc appelé à fournir le nombre de colonnes qui permettra au programme d'organiser les données sous forme de matrices. Le nombre est un entier positif.

b. Dimension des carreaux

Les dimensions des carreaux en X et en Y sont des variables d'état qui dépendent de la résolution spatiale du MNA d'entrée et font que des MNA à différentes échelles peuvent être traités.

c. Le seuil de pente

C'est la valeur de la tangente en dessous de laquelle le carreau correspondant peut être considéré horizontal ou plat.

d. Les coordonnées de l'exutoire

Ces coordonnées (rangée x colonne, ou UTM) situent spatialement l'exutoire du bassin versant hydrologique étudié sur la matrice du MNA. Pour le moment, elles sont introduite par l'utilisateur à l'aide du clavier. Outre la méthode automatique, déjà mentionnée plus haut, deux autres méthodes semi-automatiques peuvent envisagées dans le développement futur:

- la recherche automatique de l'exutoire qui, du point de vue numérique, peut être assimilé à un minimum global; et

- l'identification du point a l'aide du curseur sur une représentation visuelle du MNA, ou sur l'image numérique satellitaire du bassin étudié.

3. Les programmes principaux

Le langage de programmation utilisé dans cette recherche est le langage "C" et plus précisément le langage C de Microsoft. Les programmes principaux de PHYSITEL sont les suivants:

- entrées/sorties;
- correction des extremums;
- filtrage des altitude;
- calcul des orientations;
- Modification des orientations;
- calcul des pentes;
- détermination des puits;
- détermination des plateaux et dépressions;
- création de la base de données des caractéristiques des carreaux;
- calcul du réseau de drainage;
- calcul du masque du bassin; et
- transfert des données au système de traitement d'image ARIES-III de DIPIX.

Comme pour les fichiers, nous ne décrirons que ceux que nous jugeons importants pour la modélisation hydrologique.

a. Le programme de création de fichiers MNA compatibles à PHYSITEL "PHYSIOCF"

Ce programme permet de créer un fichier compatible au modèle physiographique à partir d'un fichier MNA de type matriciel binaire. Il créé l'entête qui contient le nombre de colonnes, le nombre de lignes, les dimensions du carreau en X et en Y, le

numéro de zone et les coordonnées UTM du premier carreau. Le programme peut reproduire le fichier d'origine en entier ou en partie. Ce programme constitue en quelque sorte la partie interactive du modèle. Il permet d'introduire les variables et les paramètres externes au modèle sous la forme requise. A l'étape actuelle de développement, le dialogue avec le programme se fait par clavier alphanumérique. Dans des développements ultérieurs il sera possible d'introduire le mode graphique (curseur, souris, stylet, etc).

```
1   for( ; ; )
2       {
3       reste -= nread;
4       if(reste <= 0L) break;
5       bufsize = (reste > bufsize) ? bufsize : reste;
6       nread = (long)fread( (char *)buf, sizeof(int), (size_t)bufsize, in);
7       nlalloc = (int)(nread / (long)nc_mne);
8       for(i = 0, k = 0; i < nlalloc; i++)
9           {
10          for(j = cd_z - 1; j < cf_z ; j++)
11              {
12              buf[k] = buf[i*nc_mne+j];
13              k++;
14              }
15          printf("%4u\b\b\b\b", ++numlig);
16          }
17      fwrite( (char *)buf, sizeof(int), k, out);
18      }
```

Lorsque la partie du fichier à créer est entièrement traitée, l'instruction de la ligne 4 interrompt la boucle et passe la commande à la fonction principale (voir annexe). La ligne 6 lit un segment de fichier. Les instructions de la ligne 6 à la ligne 16 créent un segment de fichier compatible à PHYSITEL et le conservent dans une mémoire tampon pour l'archiver ensuite dans le fichier à la ligne 17.

b. Le programme de correction du MNA "CORRIGE"

Le programme **CORRIGE** (figure 15) permet de remplacer la valeur d'altitude du carreau singulier (sommet ou puits) du modèle numérique d'altitude par celle du

plus proche voisin: la plus basse dans le cas des puits, et la plus élevée dans le cas des sommets. CORRIGE permet de réduire les discontinuités du réseau de drainage. Les données de base d'entrée du programme sont le MNA source et les données de sortie les fichiers vectoriels des minimums et des maximums et le fichier du MNA corrigé. Les noms de ces fichiers peuvent être fournis comme paramètres dans la commande d'appel du programme. Le programme comprend trois fonctions fondamentales **"TROUVE_EXTREMA"** (figure 16), **"TRAITE_MAXIMA"** et **"TRAITE_MINIMA"** (figure 17)

Chacune des fonctions accomplit une tâche déterminée. TROUVE_EXTREMA localise les sommets et les puits isolés de un carreau de dimension. TROUVE_EXTREMA commence la lecture par le carreau de la deuxième rangée et de la deuxième colonne du MNA.

La boucle principale de TROUVE_EXTREMA est listée ci dessous. La fonction complète est donnée en annexe.

```
for ( ; ; )
    {
    numread = fread ((char *)buf, sizeof(int), (size_t)bufsize, in);
    if (numread < = (int)(dim_lc[1] * 2L)) break;
    nal = (int)(numread / dim_lc[1]);
    for (i = 1, jb = js = 0; i < nal - 1; i+ +)
        {
        j1+ +;
        for (j = 1; j < (int)dim_lc[1] - 1; j+ +)
            {
            if (buf[i*dim_lc[1]+j] < buf[(i-1)*dim_lc[1]+j-1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] < buf[(i-1)*dim_lc[1]+j+1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] < buf[(i+1)*dim_lc[1]+j-1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] < buf[(i+1)*dim_lc[1]+j+1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] < buf[(i-1)*dim_lc[1]+j] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] < buf[i*dim_lc[1]+j-1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] < buf[i*dim_lc[1]+j+1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] < buf[(i+1)*dim_lc[1]+j])
                {
                jb+ +;
                (*npt)+ +;
                switch (*it)
```

```
23                  {
24                  case (0):
25                      fond.lig = (int)j1 + 1;
26                      fond.col = (int)j + 1;
27                      fond.cote = buf[i*dim_lc[1]+j];
28                      fprintf(out2," %4d  %4d  %4d  %4d\n", *npt,
29                      fond.lig, fond.col, fond.cote);
30                      break;
31                  default: break;
32                  }
33              }
34          else if (buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i-1)*dim_lc[1]+j-1] &&
35          buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i-1)*dim_lc[1]+j+1] &&
36          buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i+1)*dim_lc[1]+j-1] &&
37          buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i+1)*dim_lc[1]+j+1] &&
38          buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i-1)*dim_lc[1]+j] &&
39          buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[i*dim_lc[1]+j-1] &&
40          buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[i*dim_lc[1]+j+1] &&
41          buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i+1)*dim_lc[1]+j])
42              {
43              js++;
44              (*nsom)++;
45              switch (*it)
46                  {
47                  case (0):
48                      sommet.lig = (int)j1 + 1;
49                      sommet.col = (int)j + 1;
50                      sommet.cote = buf[i*dim_lc[1]+j];
51                      fprintf (out1," %4d  %4d  %4d  %4d\n", *nsom,
52                      sommet.lig, sommet.col, sommet.cote);
53                      break;
54                  default: break;
55                  }
56              }
57          }
58      printf ("%4lu\b\b\b\b", j1);
59      }
60  fseek (in, *off1, SEEK_CUR);
61  }
```

L'instruction de la ligne 3 lit un segment de fichier. Celle de la ligne 4 arrête la lecture quand le segment de fichier lu contient moins de 3 rangées, et cède la commande à la fonction principale. Nous rappelons qu'un minimum de trois rangées

est requis pour localiser et traiter les extremums. Les instructions des lignes 11 à 29 localisent le puits isolé. L'instruction de la ligne 26 inscrit les coordonnées du puits (numéro d'ordre, rangée, colonne, et altitude) au fichier des minimums. Les instructions des lignes 31 à 50 opèrent de façon similaire pour les sommets. Elles localisent le maximum et inscrivent ses coordonnées dans le fichier des maximums.

FIGURE 15   Algorithme de correction des extremums

DEBUT

TROUVE EXTREMA

SOMMET ET PUITS

Oui

TRAITE MAXIMA

TRAITE MINIMA

SOMMET

Oui

TRAITE MAXIMA

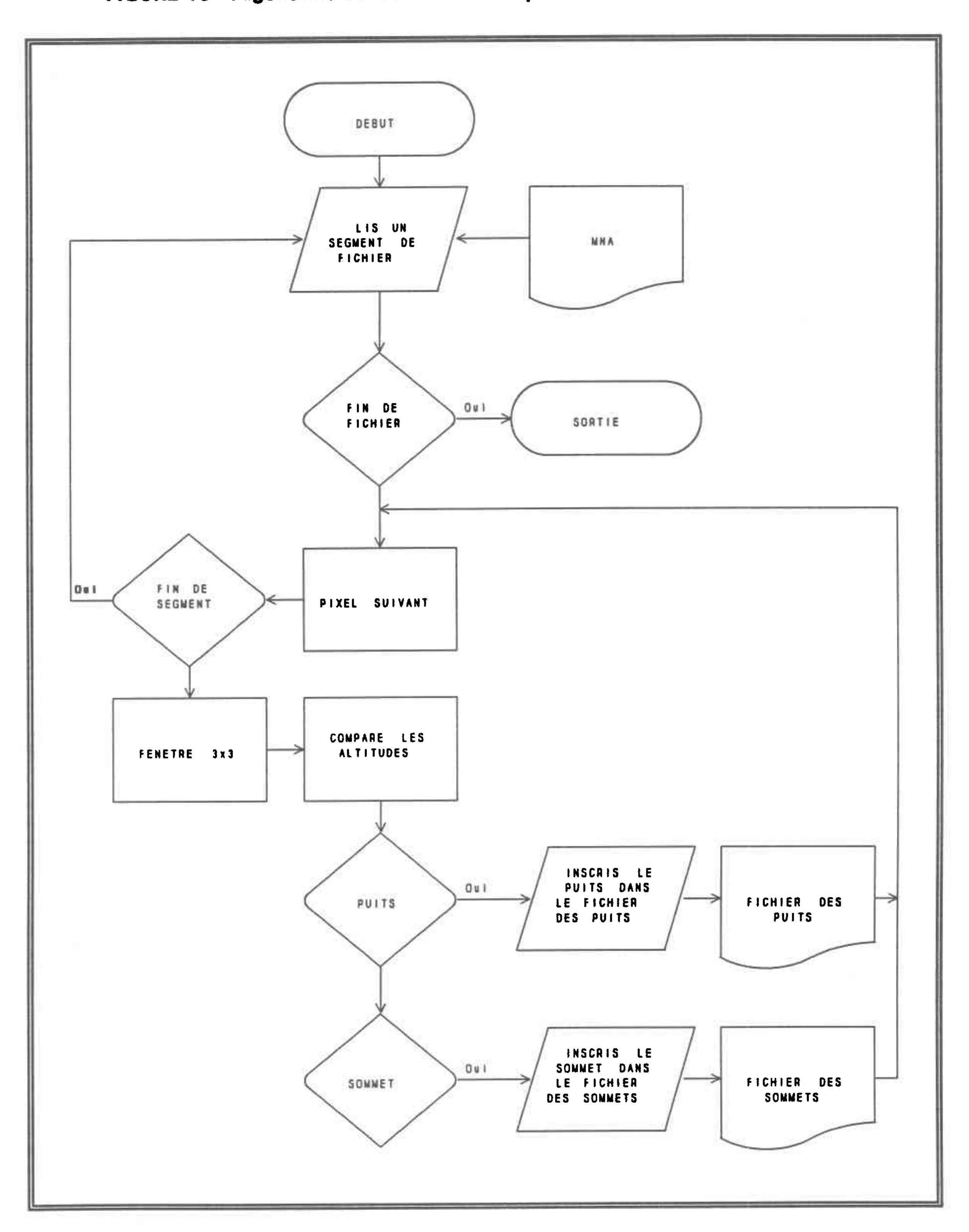
PUITS

Oui

TRAITE MINIMA

SORTIE

FIGURE 16 Algorithme de localisation des puits et des sommets (extremums)



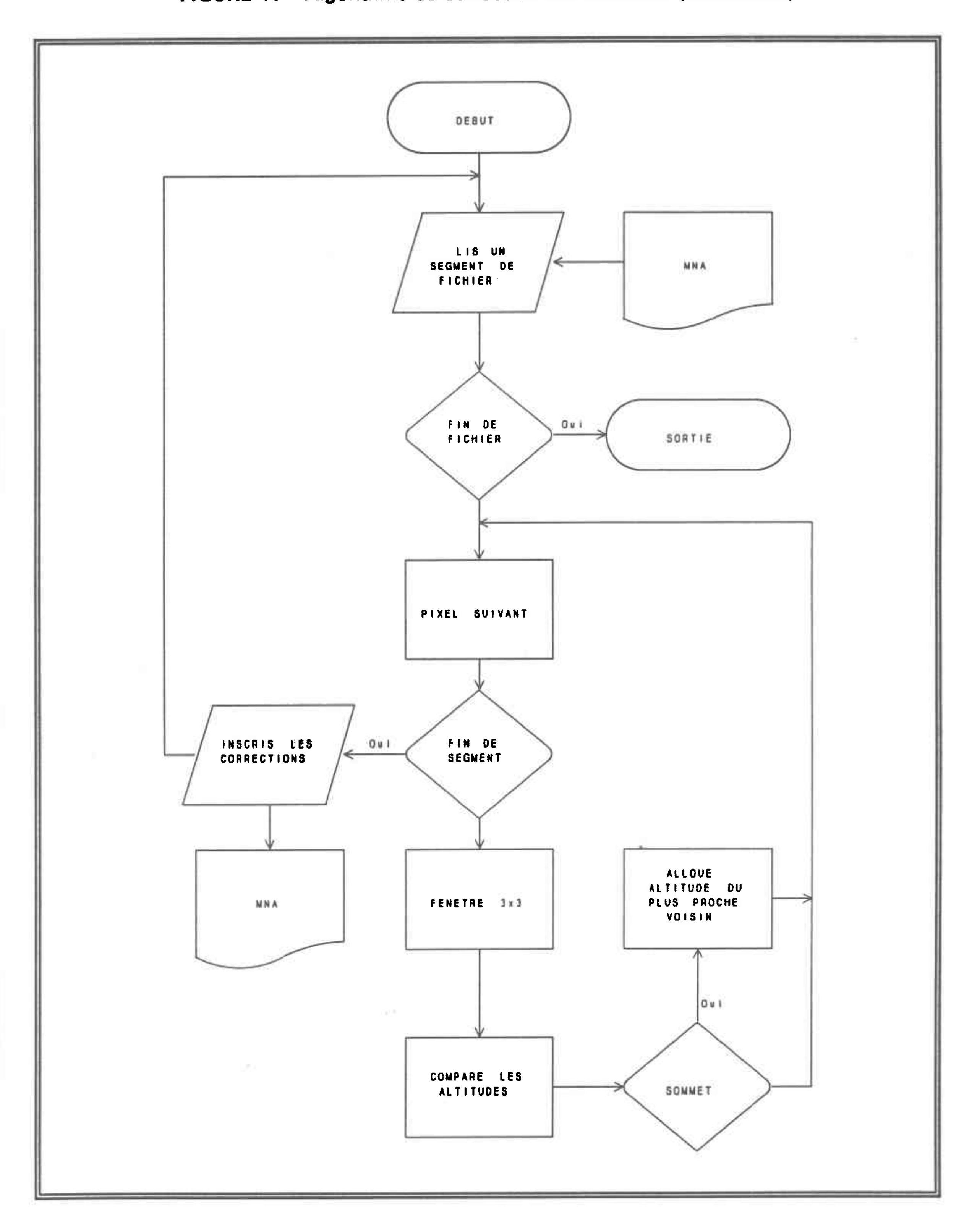
La fonction TRAITE_MAXIMA (figure 17) corrige les sommets.

La boucle principale qui effectue le travail est listée ci-dessous:

```
for( ; ; )
    {
    numread = fread ((char *)buf, sizeof(int), (size_t)bufsize, in);
    if (numread <= dim_lc[1] * 2L)    break;
    nal = numread / dim_lc[1];
    for (i = 1, je = 0L; i < nal - 1; i++)
        {
        j1++;
        for (j = 1; j < dim_lc[1] - 1; j++)
            {
            if (buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i-1)*dim_lc[1]+j-1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i-1)*dim_lc[1]+j+1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i+1)*dim_lc[1]+j-1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] > buf[(i+1)*dim_lc[1]+j+1] &&
            buf[i*dim_lc[1]+j] >
            buf[(i-1)*dim_lc[1]+j] && buf[i*dim_lc[1]+j] >
            buf[i*dim_lc[1]+j-1] && buf[i*dim_lc[1]+j] >
            buf[i*dim_lc[1]+j+1] && buf[i*dim_lc[1]+j] >
            buf[(i+1)*dim_lc[1]+j])
                {
                ind = 0;
                for (dr = -1; dr < 2; dr++)
                    for (dc = -1; dc < 2; dc++)
                        if ((dr) || (dc))
                            {
                            vec[ind] = buf[(i+dr)*dim_lc[1]+j+dc];
                            ind++;
                            }
                        qsort ((void *)vec, 8, sizeof(int), compare);
                        buf[i*dim_lc[1]+j] = vec[7];
                }
            }
        printf ("%4lu\b\b\b\b", j1);
        }
    fseek (in, -numread*sizeof(int), SEEK_CUR);
    fwrite ((char *)buf, sizeof(int), (size_t)numread, in);
    fseek (in, *off1, SEEK_CUR);
    }
```

TRAITE_MAXIMA localise le sommet (ligne 11), constitue un vecteur avec les altitudes des huit carreaux voisins (lignes 19 à 25), classe ces altitudes par ordre croissant (ligne 27), remplace l'altitude du sommet par la valeur la plus élevée de celles de ses huit voisins (ligne 27). Elle exécute de façon séquentielle ces opérations à chaque fois qu'elle rencontre un sommet dans le segment de fichier en mémoire vive. Après que tous les points du segment de fichier aient été visités, elle inscrit les altitudes au fichier du MNA corrigé (lignes 32 à 34).

FIGURE 17 Algorithme de correction des sommets (maximums)



TRAITE_MINIMA résout les puits de façon similaire à TRAITE_MAXIMA pour les sommets. Dans ce cas, les altitudes des huit carreaux voisins du puits sont classées par ordre décroissant, et l'altitude du puits est remplacée par la valeur la plus basse de ses huit voisins. Le listing de la fonction est donnée en annexe.

Il arrive souvent qu'un seul passage du programme CORRIGE ne suffise pas pour enlever tous les extremums. L'opérateur a alors l'alternative de procéder à d'autres itérations, jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucun extremum isolé dans la matrice du MNA.

c. Le programme de lissage du MNA "FILTRE"

FILTRE (figure 18) a pour rôle de lisser les formes du relief du MNA en supprimant les bruits de haute fréquence. FILTRE remplace systématiquement l'altitude du pixel par la moyenne cumulative pondérée des altitudes des huit pixels voisins et crée ensuite le fichier des altitudes filtrées. Les facteurs de pondération qu'il utilise sont les suivants:

0.0732233 - pour les carreaux voisins en X et en Y
0.0517767 - pour les carreaux diagonaux
0.5 - pour le carreau considéré

Comme le programme EXTREMA, FILTRE commence par le carreau de la deuxième rangée, deuxième colonne et finit par le carreau de l'avant dernière rangée, avant dernière colonne du MNA. Les données d'entrée de FILTRE sont le fichier du MNA corrigé ou le fichier du MNA source et les données de sortie, le fichier du MNA filtré. Le fichier de sortie a 2 lignes et 2 colonnes de moins que le fichier d'entrée.

FILTRE comporte deux fonctions **FILTRE** et **COOR_UTM_NO**. COOR_UTM_NO permet de changer les coordonnées UTM du premier pixel du MNA filtré correspondant au coin nord-ouest de la matrice, pour tenir compte de la perte de la première rangée et de la première colonne du MNA filtré par rapport au MNA source. Nous aurions

évidemment pu conserver les dimensions du fichier original inchangées, en ajoutant les carreaux originaux du pourtour de grille sans changer leurs valeurs. Cependant, par soucis d'homogénéité dans les traitements, nous avons opté pour la suppression des lignes et colonnes périphériques. Le listing de la partie de la fonction qui fait cette correction est le suivant:

```
1    {
2    utmc[0] -= (float)dY * ps[0] ;
3    utmc[1] += (float)dX * ps[1] ;
4    return(0);
5    }
```

La deuxième ligne corrige la coordonnée Y, la troisième corrige la coordonnée X. Après avoir corrigé les coordonnées, COOR_UTM_NO redonne la commande à la fonction principale qui fait appel à la fonction FILTRE.

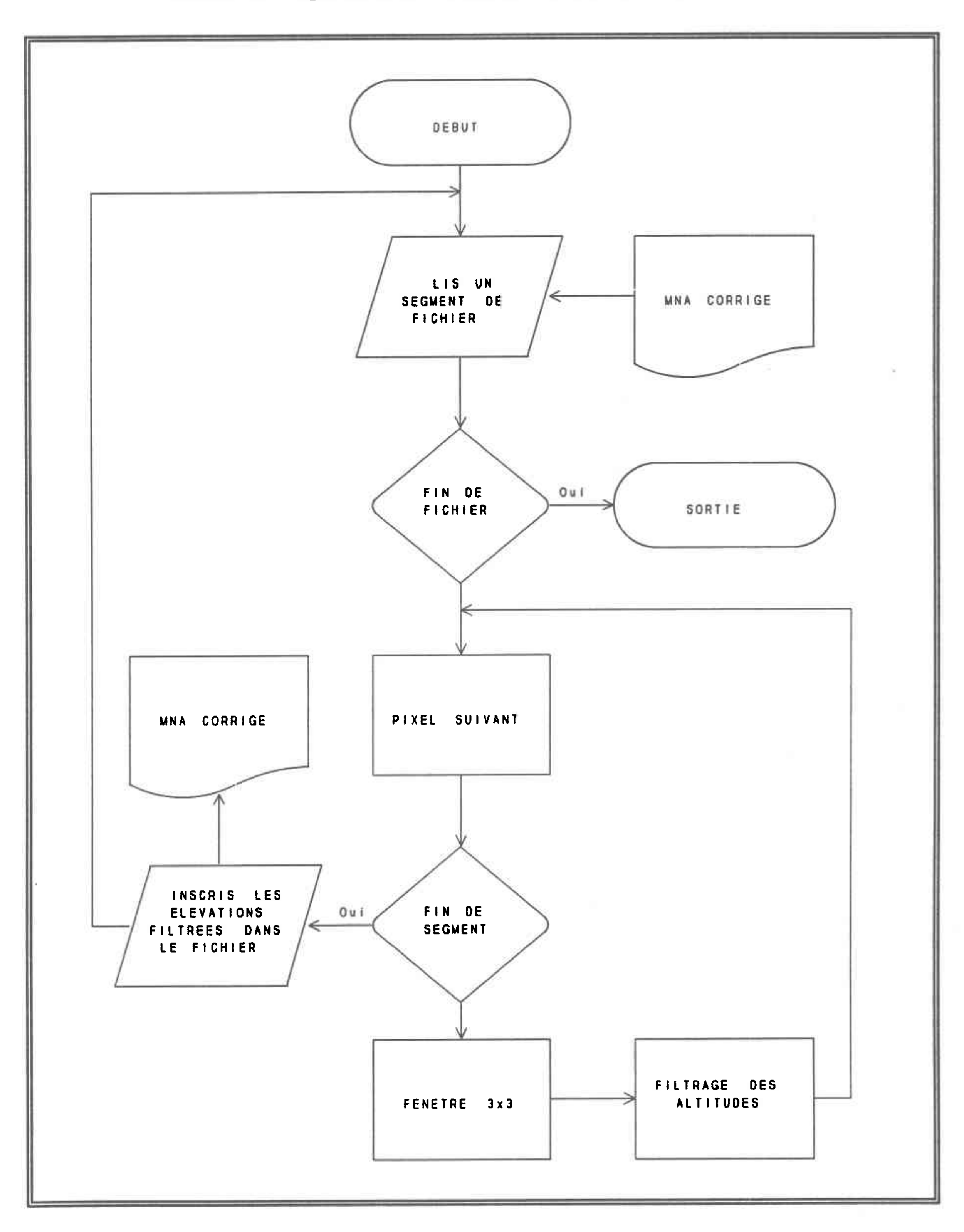
FILTRE procède au filtrage des valeurs d'altitude du MNA. Le listing de la boucle qui fait le filtrage est le suivant:

```
for ( ; ; )
    {
    nread = (long)fread ((char *)buf, sizeof(int), (size_t)(bufsize / 2L),
    in1);
    if (nread <= dim_lc[1] * 2L)  break;
    nal = (int)(nread / dim_lc[1]);
    ll = (nl > nal) ? nal : nl;
    nl -= (nal - 2);
    jc = 0;
    for (i = 1; i < ll - 1; i++)
        {
        for (j = 1; j < (int)dim_lc[1] - 1; j++)
            {
            buf[jc] = (int)(( (float)buf[(i-1)*dim_lc[1]+j-1] +
            (float)buf[(i-1)*dim_lc[1]+j+1] +
            (float)buf[(i+1)*dim_lc[1]+j-1] +
            (float)buf[(i+1)*dim_lc[1]+j+1]) * 0.0517767 +
            ((float)buf[(i-1)*dim_lc[1]+j] + (float)buf[i*dim_lc[1]+j-1] +
            (float)buf[i*dim_lc[1]+j+1] + (float)buf[(i+1)*dim_lc[1]+j]) *
            0.0732233 + (float)buf[i*dim_lc[1]+j] * 0.5 + 0.5);
            jc++;
```

```
22              }
23          printf ("%4u\b\b\b\b", ++k);
24          }
25      fwrite ((char *)buf, sizeof(int), jc, out1);
26      fseek (in1, off, SEEK_CUR);
27      }
```

Les instructions des lignes 9 à 20 calculent les altitudes filtrées. L'instruction de la ligne 21 inscrit le segment de MNA filtré au fichier des altitudes filtrées.

FIGURE 18 Algorithme de filtrage du modèle numérique d'altitude



d. Le programme de calcul des pentes "PENTE"

Le programme **PENTE** (figure 19) détermine la valeur de la pente de chacun des carreaux du modèle. Les noms de fichiers d'entrée et de sortie sont fournis comme paramètres dans la commande d'appel du programme. Le fichier de sortie a 2 lignes et 2 colonnes de moins que le fichier d'entrée.

PENTE lit le fichier des altitude, calcule les dérivées partielles par les différences finies, calcule la pente du carreau et crée le fichier des pentes. Comme FILTRE, PENTE possède deux fonctions: la première **COOR_UTM_NO** permet d'ajuster les coordonnées UTM du premier pixel du fichier des pentes et la seconde **PENTE** calcule les pentes des carreaux. La pente est exprimée en millièmes (ppm).

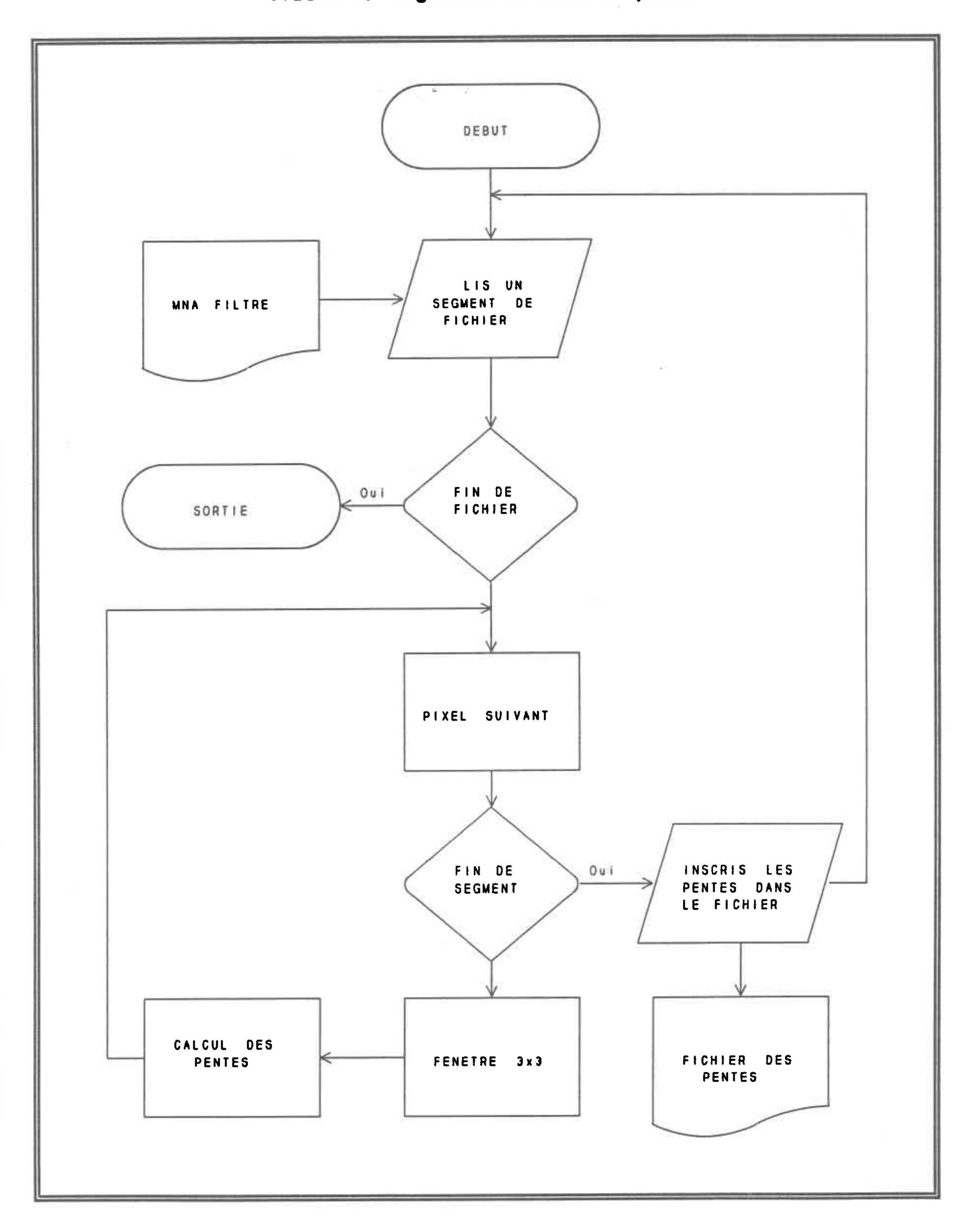
La fonction de calcul des pentes est programmée de la façon suivante:

```
for( ; ; )
    {
    nread = (long)fread((char *)buf, sizeof(int), (size_t)(bufsize / 2L),
    in1);
    if(nread <= dim_lc[1] * 2L) break;
    nal = (int)(nread / dim_lc[1]);
    ll = (nl > nal) ? nal : nl;
    nl -= (nal - 2);
    j1 = 0;
    for(i = 1; i < ll - 1; i++)
        {
        for(j = 1; j < (int)dim_lc[1] - 1; j++)
            {
            xtg = ((float)buf[i*dim_lc[1]+j-1L] -
            (float)buf[i*dim_lc[1]+j+1L]) / ((float)2.0 * ps[1]);
            ytg = ((float)buf[(i+1L)*dim_lc[1]+j] -
            (float)buf[(i-1L)*dim_lc[1]+j]) / ((float)2.0 * ps[0]);
            if(! xtg && ! ytg) buf[j1] = 0;
            else
                buf[j1] = (int)(1000.0 * pow((pow(xtg, 2.0) + pow(ytg,
                2.0)), 0.5) + 0.5);
            j1++;
            }
```

```
24            printf("%4u\b\b\b\b", ++k);
25            }
26        fwrite((char *)buf, sizeof(int), j1, out1);
27        fseek(in1, off, SEEK_CUR);
28        }
```

L'instruction de la ligne 3 permet de lire un segment de fichier. Celle de la ligne 5 est pour sortir de la boucle quand le segment de fichier lu contient moins de deux lignes. Nous rappelons qu'un minimum de trois lignes est requis pour calculer les pentes. La ligne 21 calcule la tangente du carreau qui est conservée temporairement dans une mémoire tampon. Après que toutes les pentes du segment de fichier aient été calculées, l'instruction de la ligne 27 inscrit les tangentes dans le fichier des tangentes. La ligne 28 déplace le pointeur de lecture vers le segment suivant. Le processus est ainsi réitéré, jusqu'à ce que tout le fichier du MNA ait été traité.

FIGURE 19 Algorithme de calcul des pentes



e. Le programme de détermination des orientations des pentes "ORIENTE"

Le programme **ORIENTE** (figure 20) détermine l'orientation des carreaux. Les noms des paramètres d'entrée et de sortie sont fournis dans la commande d'appel du programme. ORIENTE lit le fichier des altitude filtré ou non, selon le cas, calcule la tangente de la pente des pixels, calcule l'orientation angulaire par la première des deux méthodes décrites ci-dessus, et attribue le code correspondant à l'orientation. Si l'orientation d'un pixel quelconque calculée par cette méthode s'avère nulle, il utilise la seconde et crée le fichier des orientations. Comme FILTRE et PENTE, ORIENTE possède deux fonctions. La première **COOR_UTM_NO** permet d'ajuster les coordonnées UTM du premier pixel du fichier des orientations et la seconde **ORIENTE** calcule les pentes des carreaux.

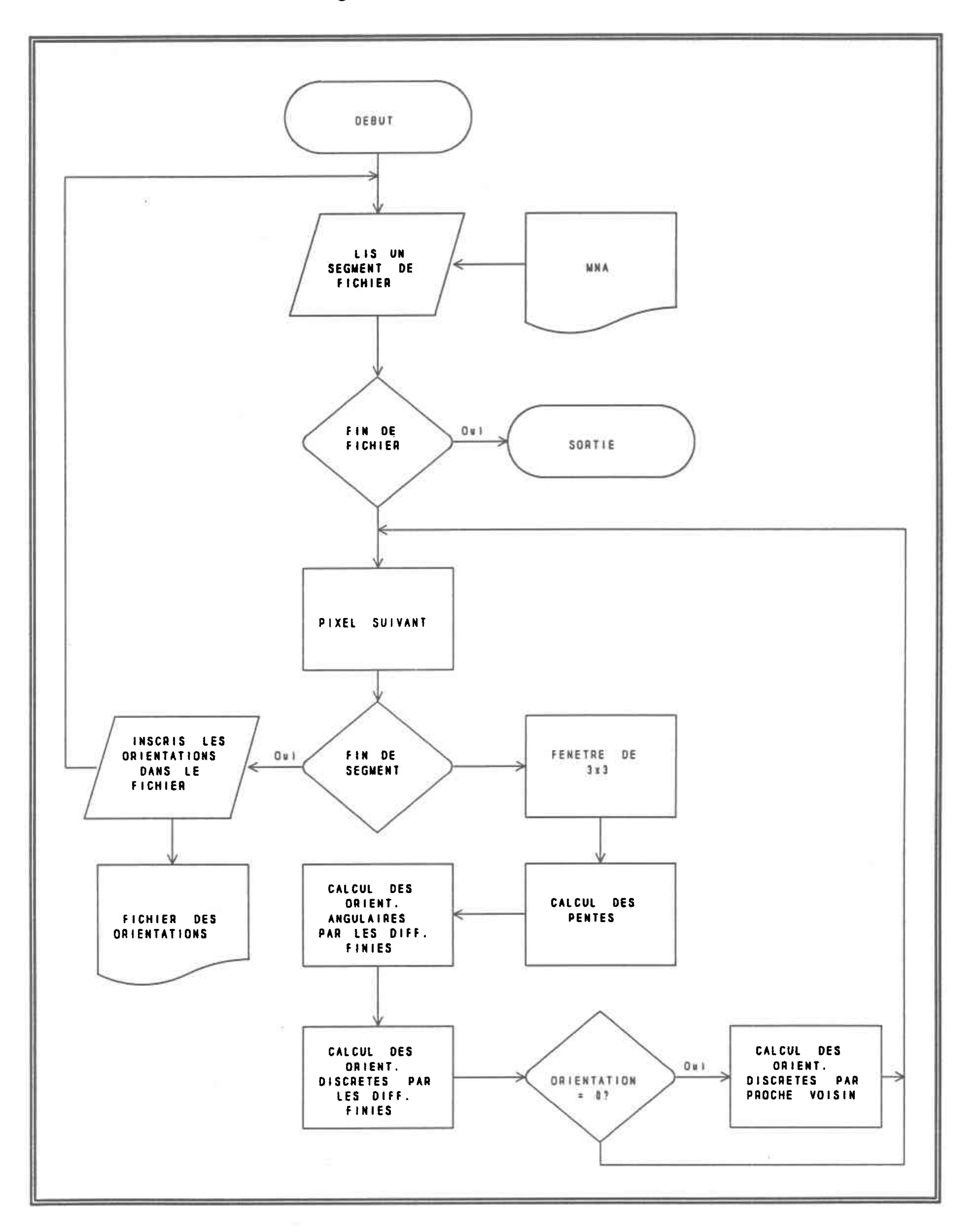
```
for ( ; ; )
    {
    nread = (long)fread ((char *)buf, sizeof(int), (size_t)(bufsize / 2L),
    in1);
    if (nread <= dim_lc[1] * 2L)  break;
    nal = (int)(nread / dim_lc[1]);
    ll = (nl > nal) ? nal : nl;
    nl -= (nal - 2);
    j1 = 0;
    for(i = 1; i < ll - 1; i++)
        {
        for(j = 1; j < (int)dim_lc[1] - 1; j++)
            {
            dhx = (double)buf[i*dim_lc[1]+j-1L] -
            (double)buf[i*dim_lc[1]+j+1L];
            dhy = (double)buf[(i+1L)*dim_lc[1]+j] -
            (double)buf[(i-1L)*dim_lc[1]+j];
            if (dhx == (double)0.0 && dhy == (double)0.0)
                ang = (double)0.0;
            else
                ang = atan2(dhy, dhx);
            if (ang)
                {
                if (ang > lim[1] && ang <= lim[0])       ori = 3;
                else if(ang > lim[2] && ang <= lim[1]) ori = 2;
                else if(ang > lim[3] && ang <= lim[2]) ori = 1;
```

```
27                      else if(ang > lim[4] && ang <= lim[3]) ori = 8;
28                      else if(ang > lim[5] && ang <= lim[4]) ori = 7;
29                      else if(ang > lim[6] && ang <= lim[5]) ori = 6;
30                      else if(ang > lim[0] && ang <= lim[7]) ori = 4;
31                      else if(ang > lim[7] || ang <= lim[6]) ori = 5;
32                      }
33                  else
34                      {
35                      lc = 1;
36                      cc = 1;
37                      maxdh = (double)0.0;
38                      for (di=-1; di <= 1; di++)
39                          {
40                          ii = i + di;
41                          for (dj = -1; dj <= 1; dj++)
42                              {
43                              jj = j + dj;
44                              dh = (di && dj)? ((double)buf[i*dim_lc[1]+j] -
45                              (double)buf[ii*dim_lc[1]+jj]) / 1.414 :
46                              (double)buf[i*dim_lc[1]+j] -
47                              (double)buf[ii*dim_lc[1]+jj];
48                              if (dh > maxdh)
49                                  {
50                                  maxdh = dh;
51                                  lc = di + 1;
52                                  cc = dj + 1;
53                                  }
54                              }
55                          }
56                          ori = orient[lc][cc];
57                      }
58                      buf1[j1] = ori;
59                      j1++;
60                  }
61                  printf ("%4u\b\b\b\b", ++k);
62              }
63              fwrite((char *)buf1, sizeof(unsigned int), j1, out1);
64              fseek(in1, off, SEEK_CUR);
65          }
```

L'instruction de la ligne 3 lit un segment de matrice du MNA dans le fichier. La ligne 4 interrompt la boucle lorsque le segment lu contient moins de trois rangées. Les instructions des lignes 13 à 20 calculent la tangente du carreau. Lorsque la pente

n'est pas nulle, les instructions des lignes 23 à 30 calculent l'orientation par la méthode de l'azimut du vecteur normal. Lorsque la pente est nulle, les instructions des lignes suivantes jusqu'à la ligne 55 orientent le carreau vers le plus bas des huit voisins. Dans ce cas l'altitude des carreaux diagonaux est pondérée par la racine carrée de 2 pour tenir compte de la distance. L'instruction de la ligne 57 conserve l'orientation calculée dans la mémoire tampon. La ligne 59 inscrit le segment de la matrice des orientations traitées au fichier des orientations.

FIGURE 20 Algorithme de calcul des orientations des pentes



f. Le programme d'ajustement des fichiers "AJUSTE"

Le programme **AJUSTE** permet d'enlever la première ligne et la première colonne, ainsi que la dernière ligne et la dernière colonne au fichier des altitude pour lui donner les mêmes dimensions que les fichiers des orientations et des pentes. Les noms des paramètres d'entrée et de sortie sont fournis dans la commande d'appel du programme.

AJUSTE comporte deux fonctions. La première **COOR_UTM_NO** permet d'ajuster les coordonnées UTM du premier pixel du MNA filtré et la seconde **AJUSTE** de copier les données du fichier d'entrée à l'exception de la première et de la dernière rangées ainsi que de la première et de la dernière lignes au fichier de sortie.

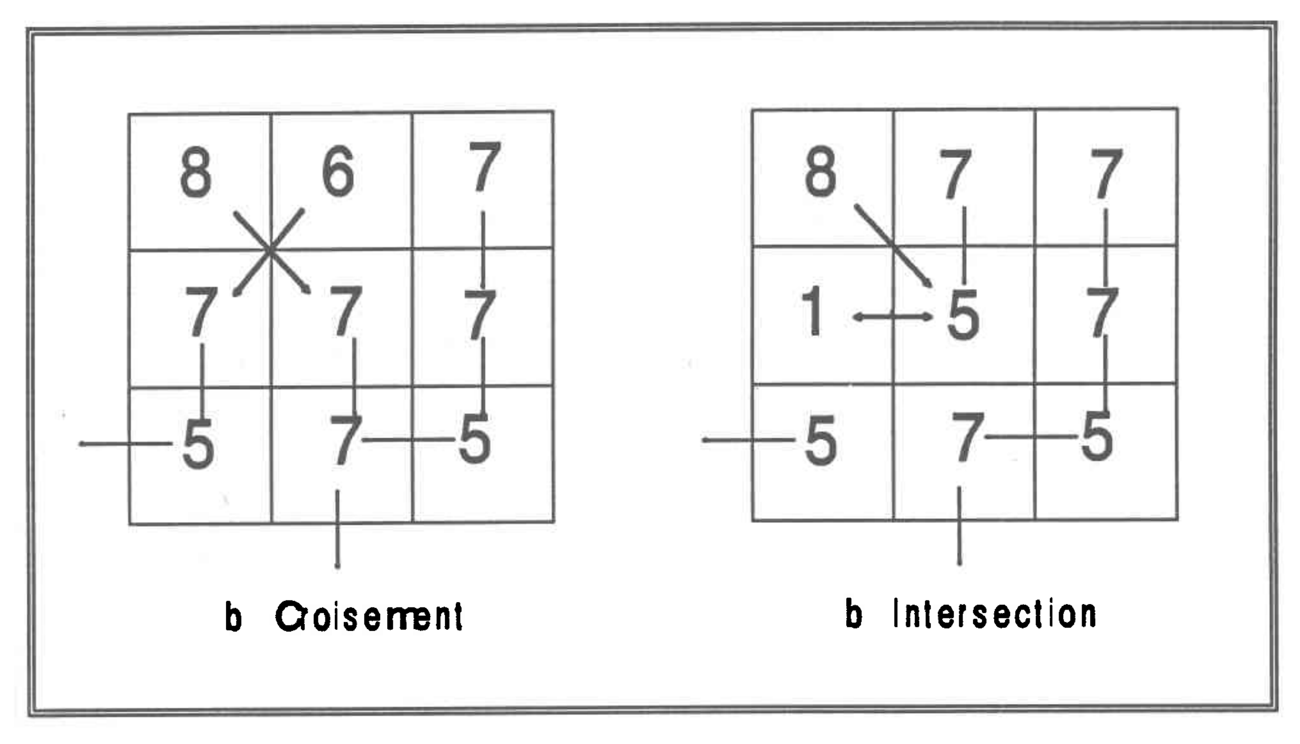
g. Le programme de correction des orientations "MANOR"

Comme elles sont calculées par deux méthodes (les dérivées partielles et les altitudes), deux types de problèmes peuvent se présenter avec les orientations:

- Le croisement des orientations qui peut arriver dans le sens des diagonales uniquement (figure 21 a); et

- L'intersection qui se produit quand les pentes des carreaux voisins sont orientées l'une vers l'autre (figure 21 b).

FIGURE 21 Ambiguïté des écoulements



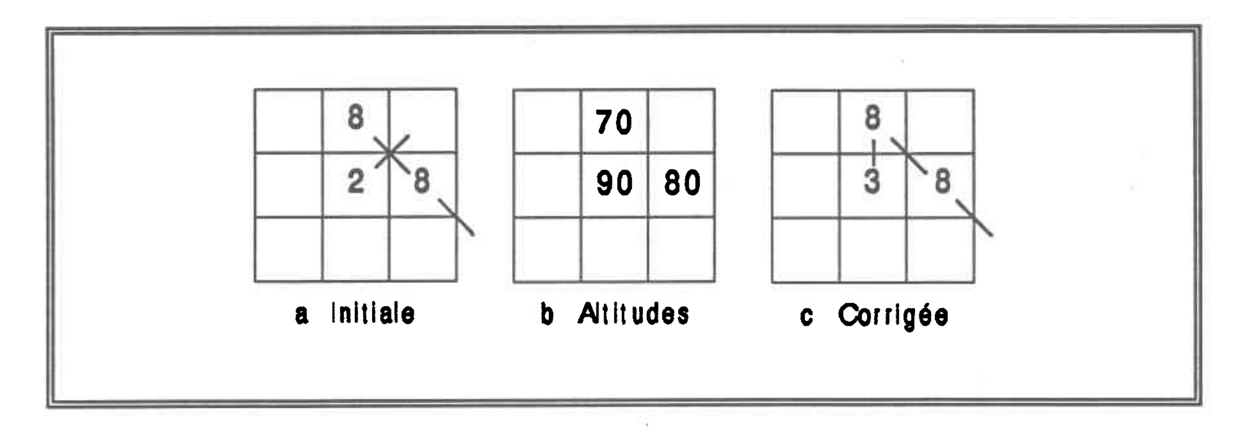
Le programme MANOR permet de corriger partiellement ces problèmes. La fonction **"CORRIGE_ORIENT"** lit les fichiers des orientations, des pentes et des altitude et résout successivement les problèmes de croisement de l'écoulement dans le sens diagonal et ensuite le problème des carreaux voisins qui se déversent l'un dans l'autre, en se basant sur les données d'altitude et de pentes. Le traitement dans cet ordre (croisement ensuite intersection) est important, parce que la correction du croisement peut entraîner une intersection alors que la réciproque n'est pas vraie.

L'extrait qui suit de la fonction CORRIGE_ORIENT et les graphes qui l'accompagnent illustrent de façon claire la méthode numérique utilisée pour ce faire:

```
for (i = 1; i < ll - 1; i++)
   {
   for (j = 1; j < (int)dim_lc[1] - 1; j++)
      {
      /* Croisement */
      switch (buf1[i*dim_lc[1]+j])
         {
         case (2):
```

```
if (buf1[(i-1)*dim_lc[1]+j] = = 8)
   {
   if (buf2[i*dim_lc[1]+j] > buf2[(i-1)*dim_lc[1]+j] &&
   buf2[(i-1)*dim_lc[1]+j] < buf2[i*dim_lc[1]+j+1] &&
   buf1[i*dim_lc[1]+j+1] != 5)
      {
      buf1[i*dim_lc[1]+j] = 3;
      break;
      }
```

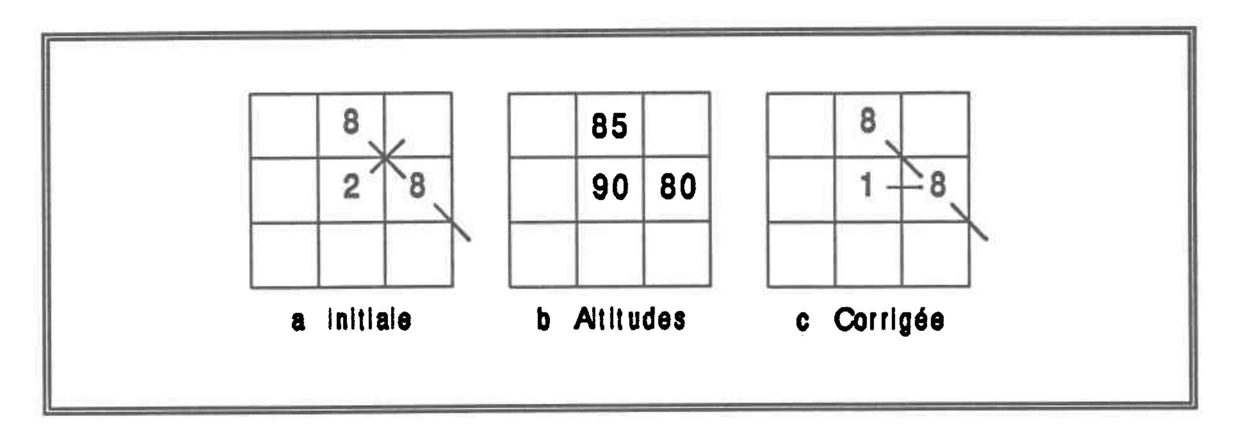
FIGURE 22 Résolution d'un croisement (1° cas)



Les orientations des carreaux voisins [i,j] et [i,j-1], respectivement égales à 2 et à 8, se croisent (figure 22 a). Cette situation ne peut pas se rencontrer sur le terrain. MANOR la corrige en remplaçant l'orientation du carreau [i,j] par 3 (figure 22 c) pour qu'il se déverse vers le carreau [i,j-1], à condition toutefois que l'altitude du carreau [i,j] soit supérieure à celle du carreau [i-1,j] et que celle de ce dernier soit inférieure à celle de [i,j+1] (figure 22 b). l'orientation de [i,j+1] doit aussi être différente de 5. Autrement, l'opération créerait une boucle.

```
   else if (buf2[i*dim_lc[1]+j] > buf2[i*dim_lc[1]+j+1])
      {
      buf1[i*dim_lc[1]+j] = 1;
      break;
      }
```

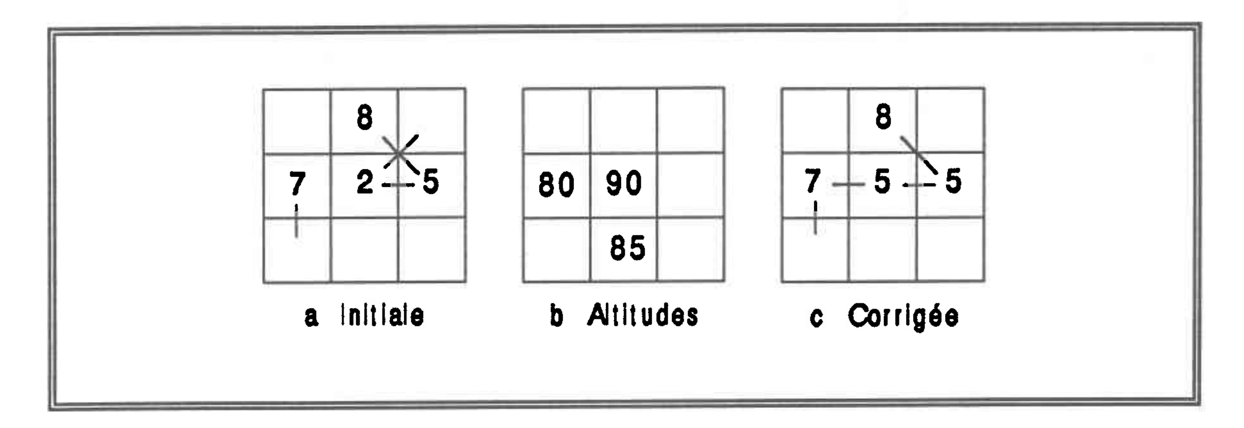
FIGURE 23 Résolution d'un croisement (2° cas)



Autrement, lorsque l'altitude du carreau [i,j+1] est supérieure à celle du carreau [i-1,j] (figure 23 b), MANOR oriente le carreau [i,j] vers le carreau [i-1,j] (figure 23 c).

```
else if(buf2[i*dim_lc[1]+j] > buf2[(i)*dim_lc[1]+j-1] &&
buf2[(i)*dim_lc[1]+j-1] < buf2[(i+1)*dim_lc[1]+j] &&
buf1[(i)*dim_lc[1]+j-1] != 2)
    {
    buf1[i*dim_lc[1]+j] = 5;
    break;
    }
```

FIGURE 24 Résolution d'un croisement (3° cas)

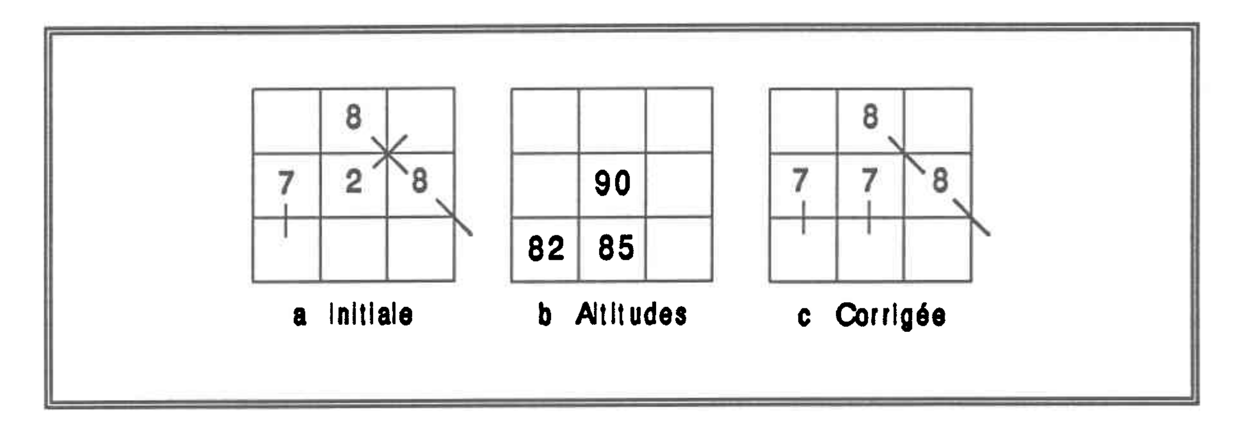


Lorsque l'altitude du carreau [i,j] est supérieure à celle du carreau [i,j-1], que l'altitude de ce dernier est inférieure à celle du carreau [i+1,j] (figure 24 b) et que

l'orientation de [i,j-1] est différente de 2 (figure 24 a), pour éviter une boucle, MANOR oriente le carreau [i,j] vers le carreau [i,j-1] (figure 24 c).

```
else if(buf2[i*dim_lc[1]+j] > buf2[(i+1)*dim_lc[1]+j])
    {
    buf1[i*dim_lc[1]+j] = 7;
    break;
    }
```

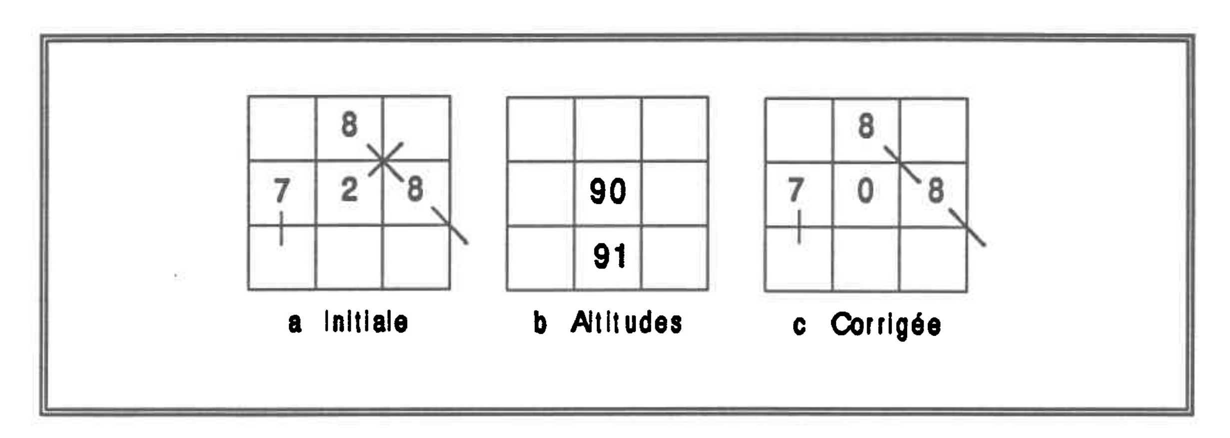
FIGURE 25 Résolution d'un croisement (4° cas)



Lorsque l'altitude du carreau [i,j] est supérieure à celle du carreau [i+1,j] (figure 25 b), MANOR oriente le carreau [i,j] vers le carreau [i+1,j] (figure 25 c).

```
else
    {
    buf1[i*dim_lc[1]+j] = 0;
    break;
    }
break;
}
```

FIGURE 26 Résolution d'un croisement (5° cas)

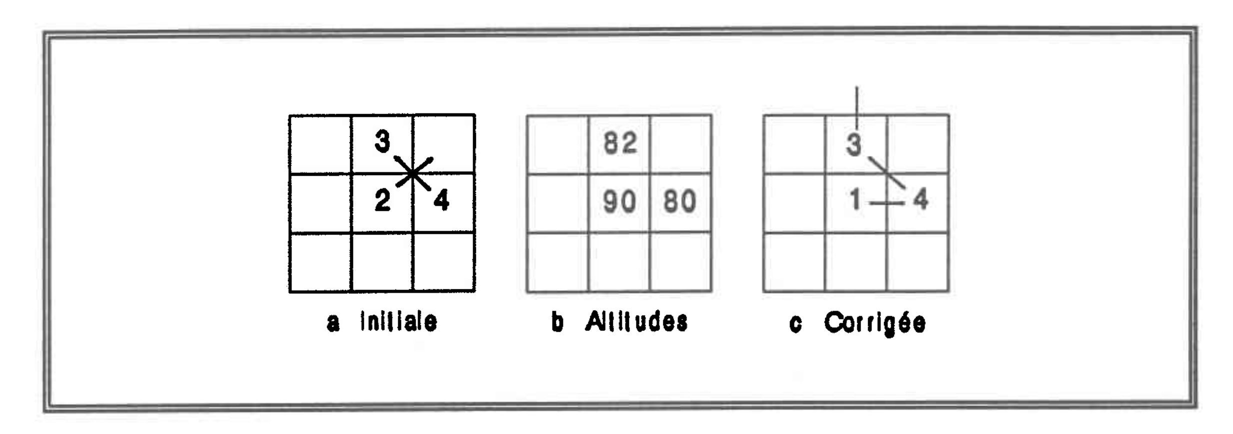


Dans tous les autres cas, l'orientation du carreau [1,j] est mise à 0, code du carreau plat (figure 26).

Les cinq exemples suivants (figures 27 à 31) illustrent la résolution du cas où les orientations des carreaux [i,j] et [i,j+1] se croisent. Nous ne les commenterons pas parce que, bien qu'elles fassent partie d'une série de corrections, elles n'amènent rien de nouveau.

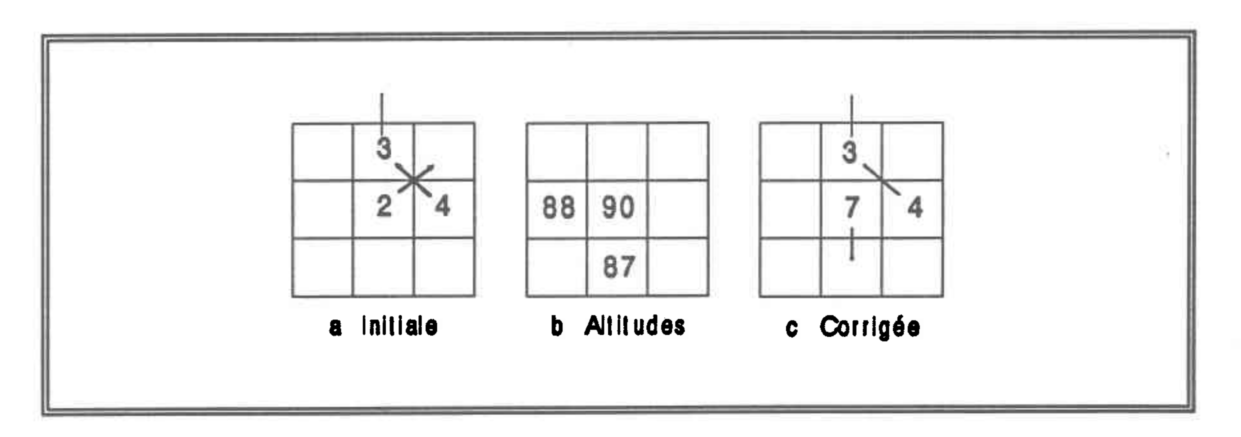
```
else if (buf1[i*dim_lc[1]+j+1] == 4)
    {
    if (buf2[i*dim_lc[1]+j] > buf2[i*dim_lc[1]+j+1] &&
    buf2[i*dim_lc[1]+j+1] < buf2[(i-1)*dim_lc[1]+j] &&
    buf1[(i-1)*dim_lc[1]+j] != 7)
        {
        buf1[i*dim_lc[1]+j] = 1;
        break;
        }
```

FIGURE 27 Résolution d'un croisement (6° cas)



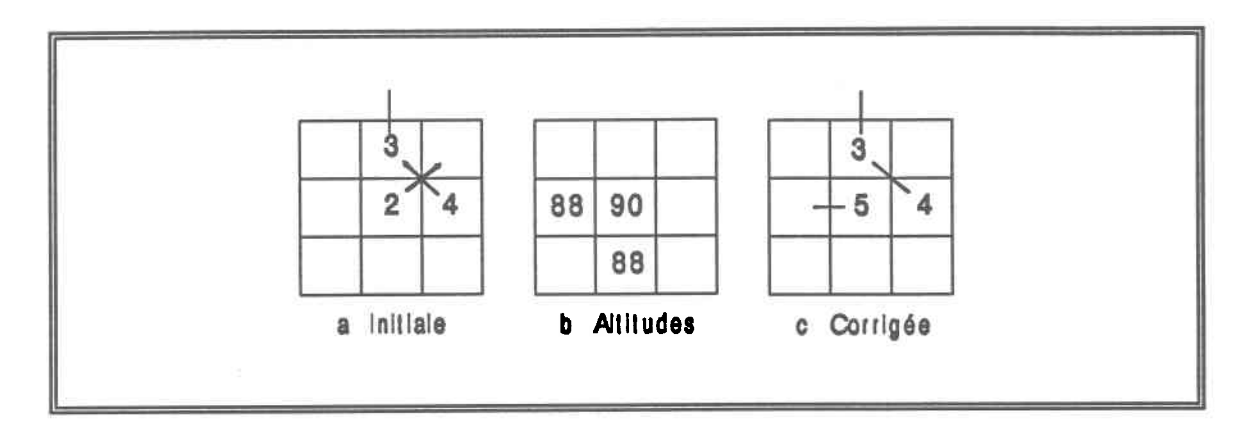

```
else if (buf2[i*dim_lc[1]+j] > buf2[(i-1)*dim_lc[1]+j])
    {
    buf1[i*dim_lc[1]+j] = 3;
    break;
    }
```

FIGURE 28 Résolution d'un croisement (7° cas)



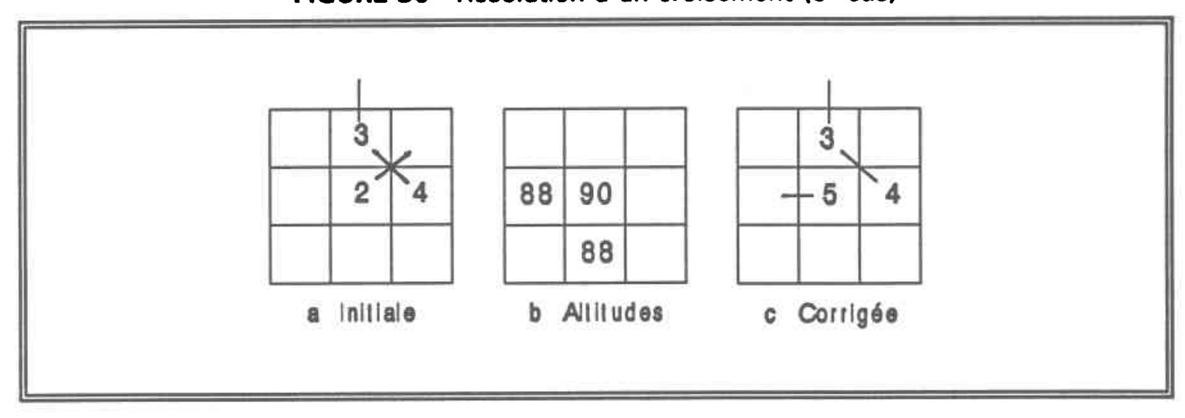

```
else if (buf2[i*dim_lc[1]+j] > buf2[(i+1)*dim_lc[1]+j] &&
buf2[(i+1)*dim_lc[1]+j]<buf2[i*dim_lc[1]+j-1])
        {
        buf1[i*dim_lc[1]+j]=7;
        break;
        }
```

FIGURE 29 Résolution d'un croisement (8° cas)



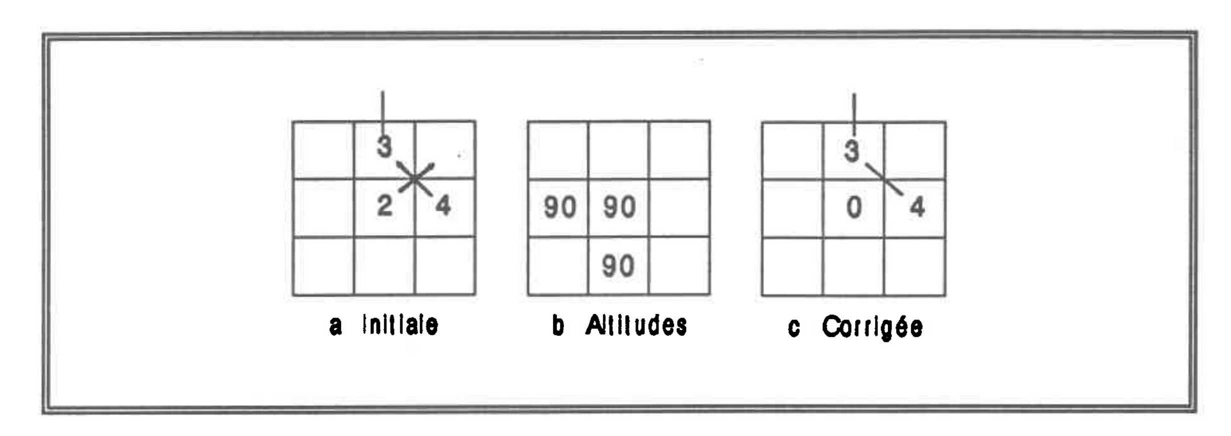

```
        else if(buf2[i*dim_lc[1]+j]>buf2[i*dim_lc[1]+j-1])
            {
            buf1[i*dim_lc[1]+j]=5;
            break;
            }
```

FIGURE 30 Résolution d'un croisement (9° cas)




```
        else
            {
            buf1[i*dim_lc[1]+j]=0;
            break;
            }
        break;
        }
    break;
```

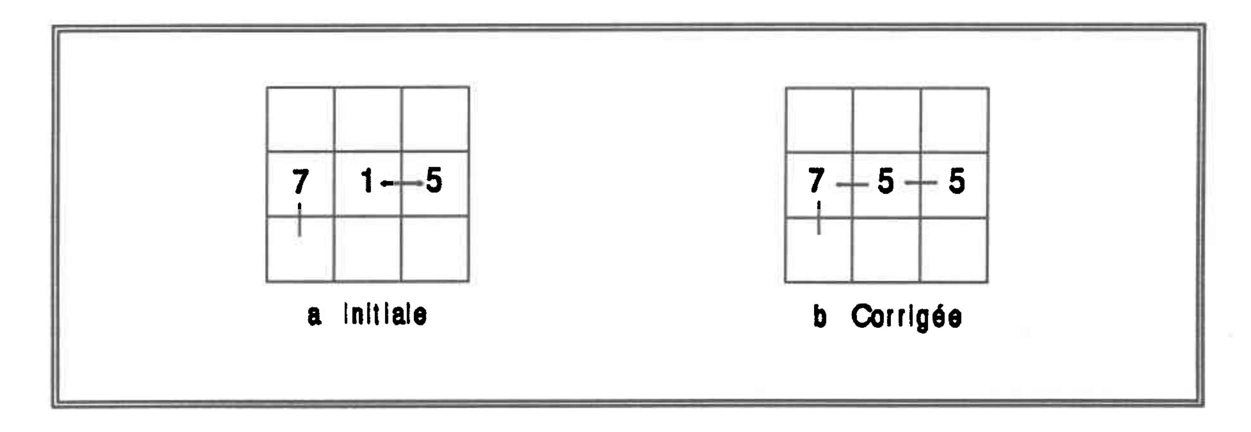
FIGURE 31 Résolution d'un croisement (10° cas)



Les exemples suivant traitent les cas d'intersection.

```
switch (buf1[i*dim_lc[1]+j])
   {
   case (1):
      if (buf1[i*dim_lc[1]+j+1] == -5) break;
      if (buf1[i*dim_lc[1]+j+1] == 5)
         {
         if (buf1[i*dim_lc[1]+j-1] != 1)
            {
            buf1[i*dim_lc[1]+j] = 5;
            break;
            }
```

FIGURE 32 Résolution d'une intersection (1° cas)

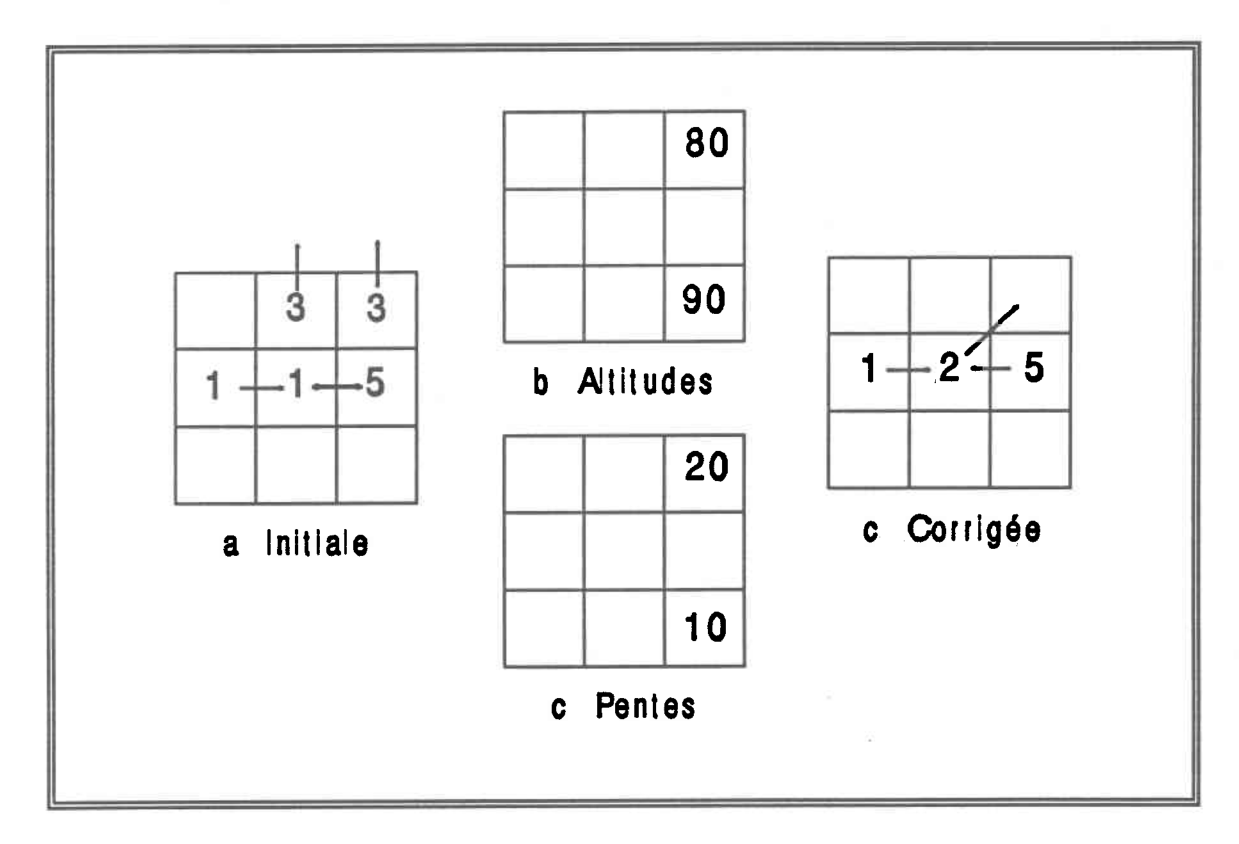


Les carreaux voisins [i,j] et [i,j+1], dont les orientations sont respectivement égales à 1 à 5 (figure 32 a), s'écoulent l'un vers l'autre, entraînant la discontinuité du réseau de drainage. MANOR corrige cette situation en remplaçant l'orientation du

carreau [i,j] par 1, pour qu'il se déverse vers le carreau [i,j-1] (figure 32 c), à condition, toutefois, que l'orientation de ce dernier soit différente de 1. Autrement, l'opération ne servirait qu'à déplacer le problème.

```
else if (buf1[(i-1 *dim_lc[1]+j+1] != 6 &&
buf1[(i-1)*dim_lc[1]+j+1] != 7 && buf1[(i-1)*dim_lc[1]+j]
!= 8 && (buf2[(i-1)*dim_lc[1]+j+1] <
buf2[(i+1)*dim_lc[1]+j+1] || buf3[(i-1)*dim_lc[1]+j+1]
>= buf3[(i+1)*dim_lc[1]+j+1]))
   {
   buf1[i*dim_lc[1]+j] = 2;
   break;
   }
```

FIGURE 33 Résolution d'une intersection (2° cas)

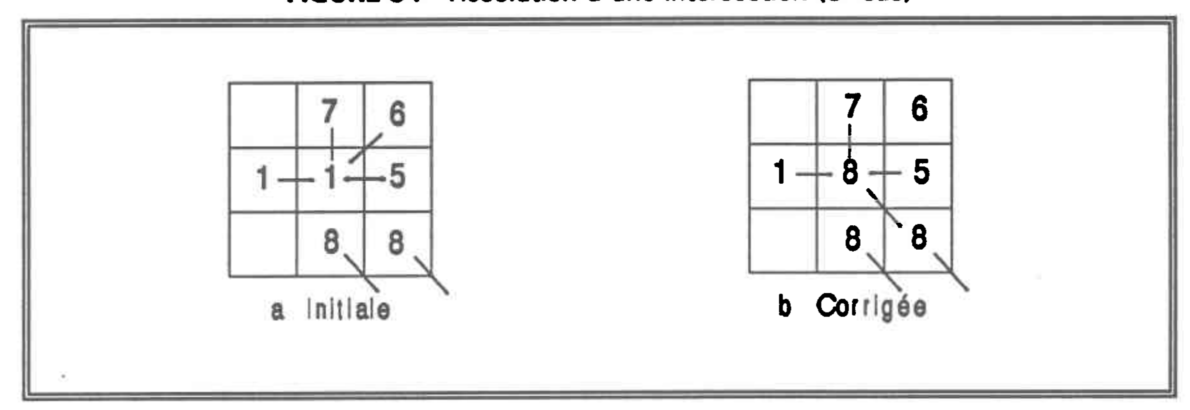


Lorsque l'orientation du carreau [i,j-1] est égale à 1, que celle du carreau [i-1,j+1] est différente de 6, pour éviter le transfert du problème et de 7, pour éviter une boucle, que celle du carreau [i-1,j] différente de 8, pour éviter de créer un croisement (figure 33 a), et que l'altitude du carreau [i-1,j+1] est inférieure ou sa

pente inférieure ou égale à celles du carreau [i+1,j+1] (figure 33 b et c), MANOR oriente le carreau [i,j] vers le carreau [i-1,j+1] (figure 33 d).

```
                    else if (buf1[(i+1)*dim_lc[1]+j+1] != 4 &&
                    buf1[(i+1)*dim_lc[1]+j] != 2)
                        {
                        buf1[i*dim_lc[1]+j] = 8;
                        break;
                        }
```

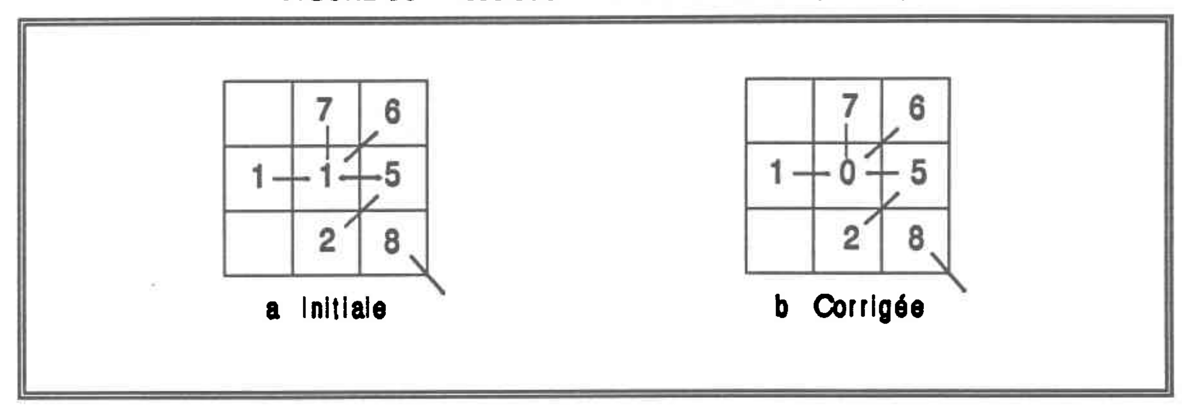
FIGURE 34 Résolution d'une intersection (3° cas)



Autrement, lorsque l'orientation du carreau [i+1,j] est différente de 2, pour éviter de créer un croisement et que celle du carreau [i+1,j+1] différente de 4, pour éviter le transfert du problème (figure 34 a), MANOR oriente le carreau [i,j] vers le carreau [i+1,j+1] (figure 34 b).

```
                    else
                        {
                        buf1[i*dim_lc[1]+j] = 0;
                        break;
                        }
                    }
                break;
```

FIGURE 35 Résolution d'une intersection (4° cas)



Si aucune de ces corrections n'est applicable, MANOR affecte la valeur O, qui est celle d'un carreau plat, et le carreau sera traité comme une dépression (figure 35).

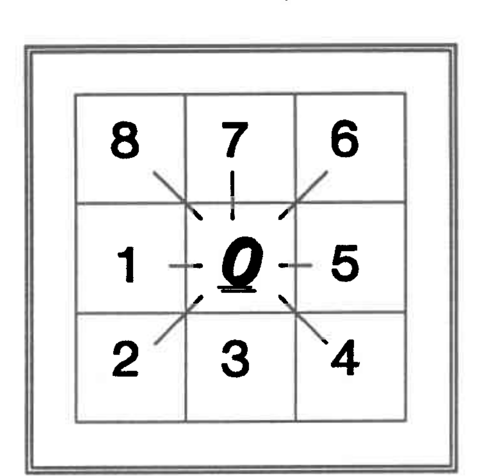
MANOR régle ainsi plusieurs dizaines de cas particuliers, plus précisément 72 dont 40 cas de croisement et 32 cas d'intersection. Si, malgré cela, il n'est pas possible de trouver une alternative valable, l'orientation du carreau est mise à zéro et le carreau considéré plat pour la suite des traitements. La méthode de correction proposée est une solution ponctuelle. Elle est basée sur l'essai et erreur et ne s'applique qu'aux cas des discontinuités les plus fréquentes que nous avons rencontrées. C'est un domaine qui reste ouvert pour la recherche de méthodes plus systématiques de correction.

h. Le programme de localisation des puits "LOCPUIT"

Ce programme permet de localiser les puits à l'aide de l'orientation des pentes. **LOCPUIT** crée un fichier de localisation des puits de type vectoriel qui contient les trois coordonnées spatiales (ligne x colonne x altitude). Les noms des paramètres d'entrée et de sortie sont fournis dans la commande d'appel du programme. Nous rappelons qu'un carreau est un puits lorsque son orientation est égale à zéro. Plus généralement, un puits est un carreau qui n'a pas d'exutoire et qui peut être défini mathématiquement comme un minimum local. La figure 36 illustre un cas de puits. Les flèches indiquent que l'écoulement se fait vers le centre du noyau, mais ce n'est là qu'un des nombreux cas. Il peut arriver qu'un ou plusieurs carreaux voisins soient

orientés vers le centre et les autres plats. L'exemple illustré ici est le pire des cas, car il crée une discontinuité dans le réseau de drainage assez difficile à solutionner. Aussi, faudrait-il les localiser pour les traiter ultérieurement et rétablir la continuité du réseau.

FIGURE 36 Exemple de puits



LOCPUIT (figure 37) lit le fichier des orientations, retient les coordonnées planimétriques des puits, lit les altitudes correspondantes sur le fichier des altitude, et crée un fichier temporaire où sont enregistrées les coordonnées spatiales des puits y compris leurs altitudes.

```
for ( ;  ; )
    {
    nread=fread((char *)buf, sizeof(short), (size_t)bufsize, in2);
    if (nread <= 0)  break;
    nal=(short)(nread/dim_lc[1]);
    ll=(nl>nal)?nal:nl;
    nl-=nal-2;
    k=0;
    for(i=0; i<ll; i++)
        {
        for(j=0; j<(short)dim_lc[1]; j++)
            {
            if(*(buf+(i*dim_lc[1]+j))<=0)
                {
                trou.lig = (short)j1+1;
                trou.col = (short)j+1;
                off=((long)j1*(dim_lc[1])+j)*2L;
```

```
18                      fseek(in1, off, SEEK_SET);
19                      fread((char *)&trou.cote, sizeof(short), 1, in1);
20                      if(trou.cote<puitmin) puitmin=trou.cote;
21                      if(trou.cote>puitmax) puitmax=trou.cote;
22                      *(buf1+k)=trou;
23                      k++;
24                      npuit++;
25                      }
26                  }
27              j1++;
28              printf("<%u>\r", j1);
29              }
30          fwrite((char *)buf1, sizeof(PLC), (short)k, out1);
31          }
32      printf("\n Nombre de puits dans le modèle: \t<%u>", npuit);
33      printf("\npuitmin = %d\tpuitmax = %d", puitmin, puitmax);
```

L'instruction de la ligne 3 lit un segment de fichier. L'instruction de la ligne 5 arrête la procédure et passe la commande à la fonction principale, après que le MNA ait été entièrement traité. La boucle des lignes 10 à 30 localise les puits dans le fichier des orientations - carreaux dont l'orientation est égale à 0, et va lire leur altitudes dans le fichier du MNA. l'instruction de la ligne 31 inscrit le numéro d'ordre et les coordonnées (X,Y et H) des puits dans le fichier vectoriel des puits. l'instruction de la ligne 34 affiche les valeurs extrêmes d'altitude des puits (maximale et minimale).

FIGURE 37 Algorithme de localisation des puits

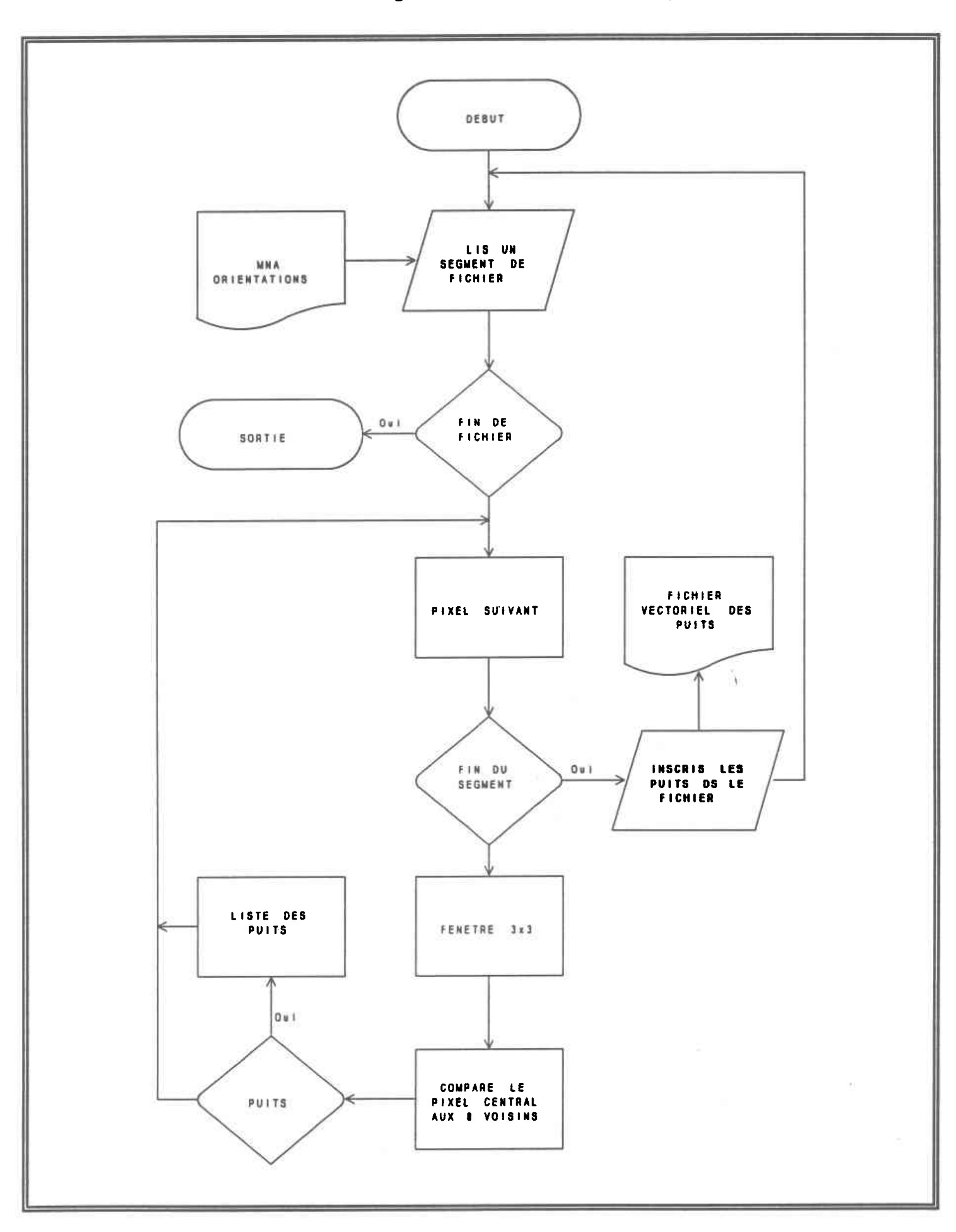
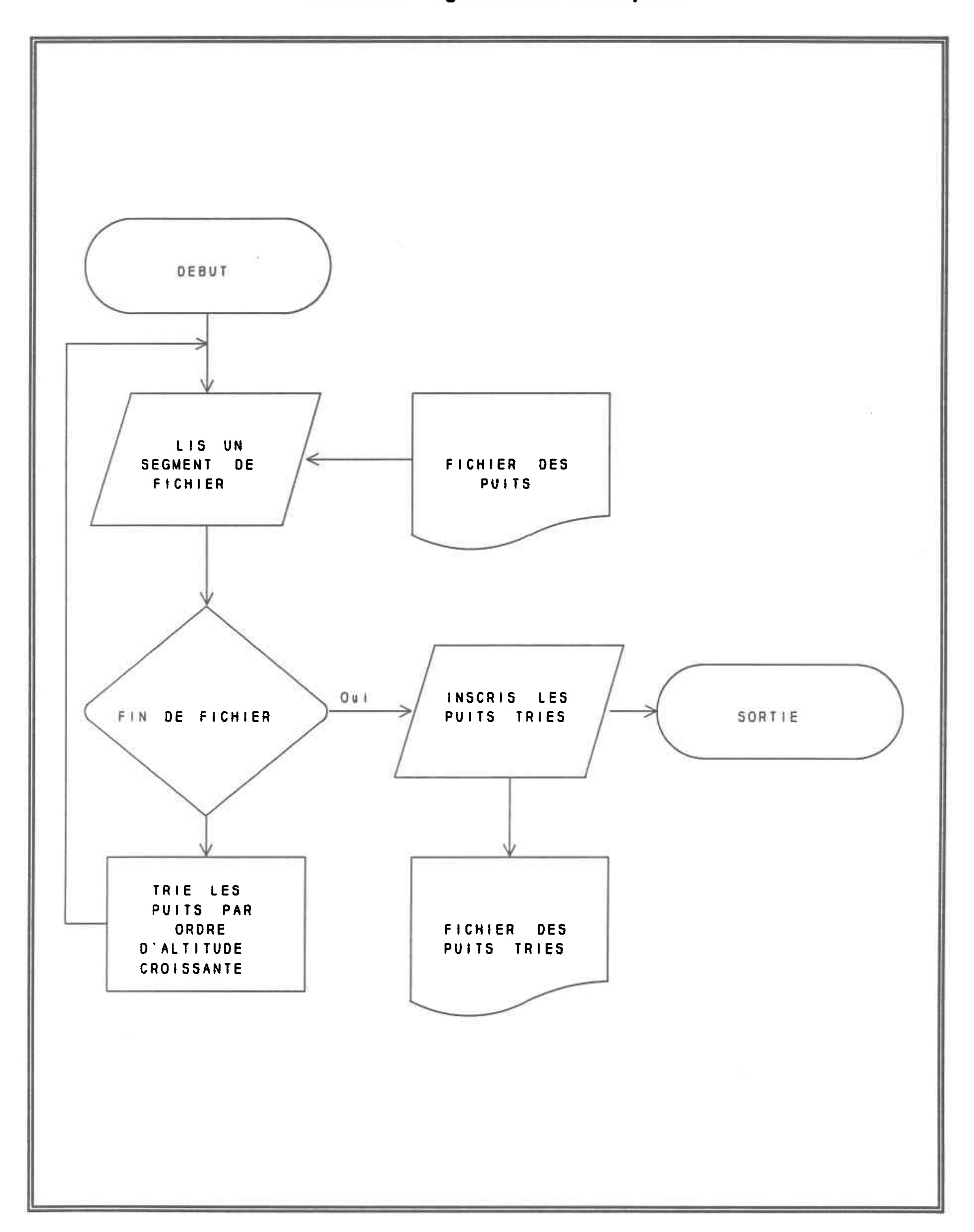


FIGURE 38 Algorithme de tri des puits



i. Le programme de tri des puits "TRIPUIT"

TRIPUIT (figure 38) trie les puits par ordre d'altitude croissante. La fonction lit les altitudes dans le fichier temporaire des puits, trie les puits, et crée un fichier final des puits triés. Le programme comporte deux fonctions TRIPUIT et COMPARE.

TRIPUIT est basée sur la fonction QSORT de la librairie du compilateur C qui effectue le trie. L'instruction de la ligne 1 trie les puits, celle de la ligne 2 les inscrit dans le fichier des puits triés.

```
1   qsort ((void *)buf, (size_t)npuit, sizeof(PLC), compare);
2   fwrite ((char *)buf, sizeof(PLC), npuit, out);
```

COMPARE compare deux vecteurs et retourne une valeur qui spécifie leur relation. QSORT fait appel a COMPARE autant de fois qu'il le faut pour trier toute la liste des puits dans la mémoire tampon.

```
if (elem1->cote > elem2->cote)
    return(1);
else if (elem1->cote < elem2->cote)
    return(-1);
else
    return(0);
```

Plusieurs fonctions ont été nécessaires pour localiser et trier les puits. Ceci illustre l'importance accordée à ces points singuliers qui, comme nous l'avons déjà spécifié, représentent des caractéristiques de formes de terrains (lacs, dépressions, plateaux) ou des erreurs du MNA. Leur répartition spatiale conjuguée à de l'information complémentaire (extérieure au MNA) peuvent aider à les définir correctement.

Il est à noter que les puits peuvent aussi être un indicateur de la qualité de la généralisation cartographique du MNA. L'identification et les traitements adéquats de ces points peuvent contribuer à améliorer la qualité du MNA. Dans le cas de PHYSITEL, le tri des puits servira pour le traitement des dépressions qui se fait d'aval en amont, en commençant par les plus basses.

j. Le programme de constitution de la base des données des caractéristiques physiques du bassin "PANIER"

Le programme **PANIER** (figure 39) permet de créer une base de données qui regroupe les caractéristiques physiques principales d'un bassin versant, pixel par pixel (masque du bassin, réseau de drainage, pentes, orientations et altitudes). C'est ce fichier qui servira de base pour les traitements ultérieurs.

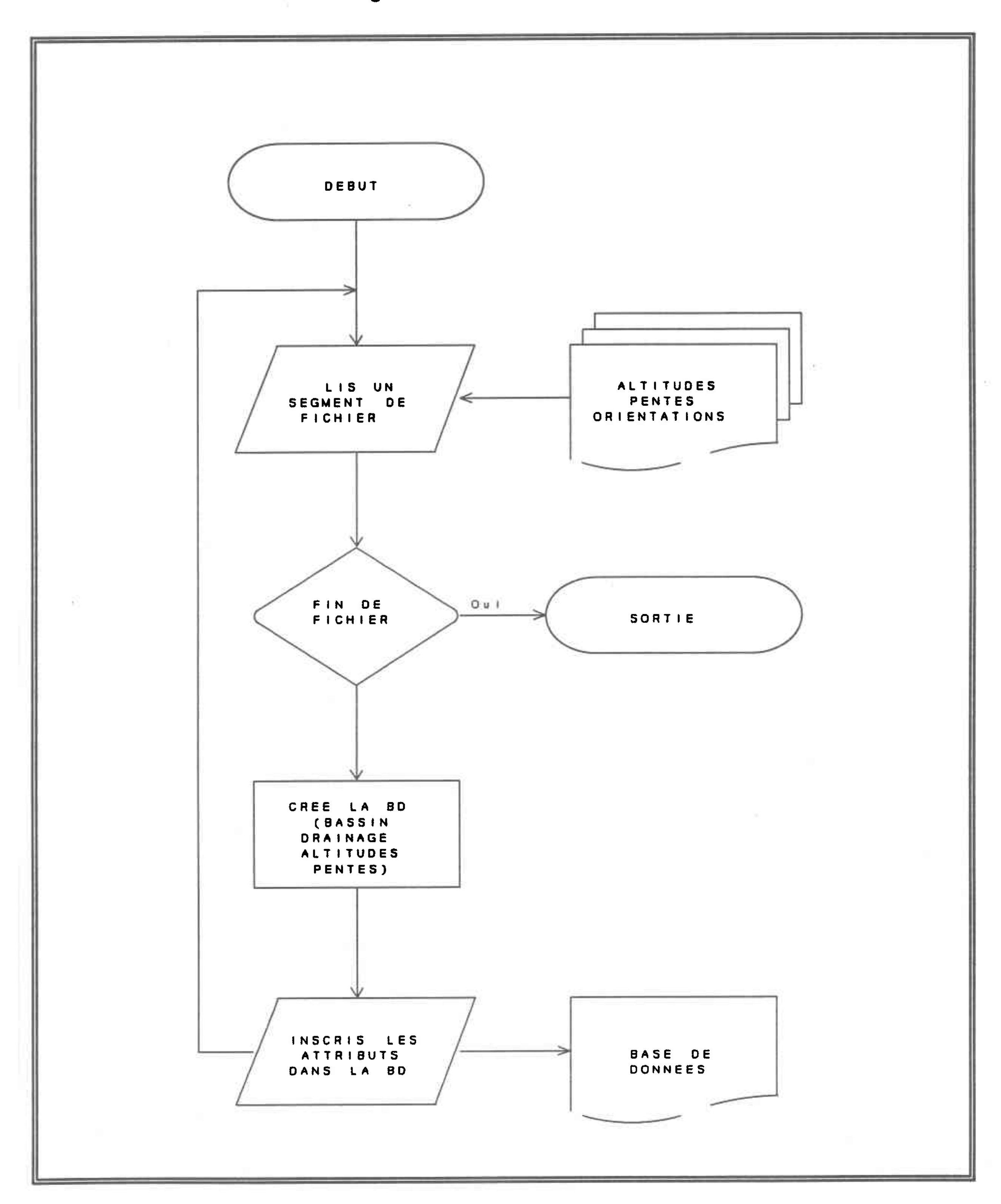
La procédure qui effectue la tâche est la suivante:

```
1    for( ; ; )
2        {
3        nread = fread ((char *)buf1, sizeof(short), bufsize, in1);
4        if (nread< =0)  break;
5        if ((fread ((char *)buf2, sizeof(short), bufsize, in2))< =0)  break;
6        if ((fread ((char *)buf3, sizeof(short), bufsize, in3))< =0)  break;
7        for(i = 0; i<nread; i+ +)
8            {
9            buf[i].bas = 0;
10           buf[i].res = 1;
11           buf[i].sens = buf1[i];
12           buf[i].pente = buf2[i];
13           buf[i].alt = buf3[i];
14           }
15       fwrite ((char *)buf, sizeof(PIX), nread , out1);
16       printf ("<%u>\r", + +k);
17       }
```

Les instructions des lignes 3 à 7 lisent un segment de données dans chacun des fichiers (altitudes, orientations et pentes). Celle de la ligne 9 initialise le matrice du bassin versant avec des 0. la ligne 10 initialise la matrice du réseau de drainage avec des 1. Les lignes 11 à 13 inscrivent les orientations, les pentes et les altitudes dans la mémoire tampon. La ligne 15 transfère le contenu de la mémoire tampon dans le fichier de la base des sonnées. L'instruction de la ligne 4 permet de quitter la boucle après que tous les carreaux du MNA aient été traités et de redonner la commande à la fonction principale.

Le fait de travailler sur un fichier de type base de données permet non seulement d'économiser de la place en mémoire, mais aussi d'accélérer les traitements ultérieurs, en limitant le nombre d'accès aux données (entrée/sortie) si ses dernières étaient conservées sur des fichiers séparés.

FIGURE 39 Algorithme de création de la base de données



k. Le programme de traitement des plateaux "DEVERSE"

Le programme **DEVERSE** (figure 40) permet de délimiter le contour des plateaux (carreaux plats) et de leur trouver un déversoir. Il crée le fichier des déversoirs et le fichier des plateaux et des puits isolés. La fonction **DEVERSOIR** lit séquentiellemet les coordonnées des puits dans le fichier des puits triés et passe la commande à la fonction **LOCDEV** qui est une fonction récursive. LOCDEV localise les carreaux plats appartenant au même plateau et assigne à chacun d'eux le numéro distinctif du plateau. Lors des récursions, à l'aller, LOCDEV change les orientations des carreaux plats du plateau de façon à ce qu'il drainent vers le puits considéré et au retour elle calcule sa superficie. A chaque fois qu'elle achève un cycle de récursion LOCDEV retourne la commande à DEVERSOIR qui termine la tâche en créant les fichiers des plateaux et des déversoirs.

```
1   while ((fread ((char *)&value, sizeof(PLC), 1, in2)! =0))
2       {
3       value.lig- =1;
4       value.col- =1;
5       + +plat;
6       printf ("numéro du puits traite: %4u \r", plat);
7       temoin=0;
8       for (i=0; i<2 ;i+ +)  coor[i]=32767;
9       for(i=2; i<4 ;i+ +)   coor[i]=0;
10      locdev (value.lig, value.col);
11      rewind (in1);
12      if (temoin>0)
13          {
14          for (i=0; i<4; i+ +)  coor[i]+ =1;
15              fprintf (out2," %5d %5d %5d %5d %5d %5d %5d %5d
16              %5d\n", seq+ +, plat, value.lig, value.col, value.cote, coor[0],
17              coor[1], coor[2], coor[3]);}}
```

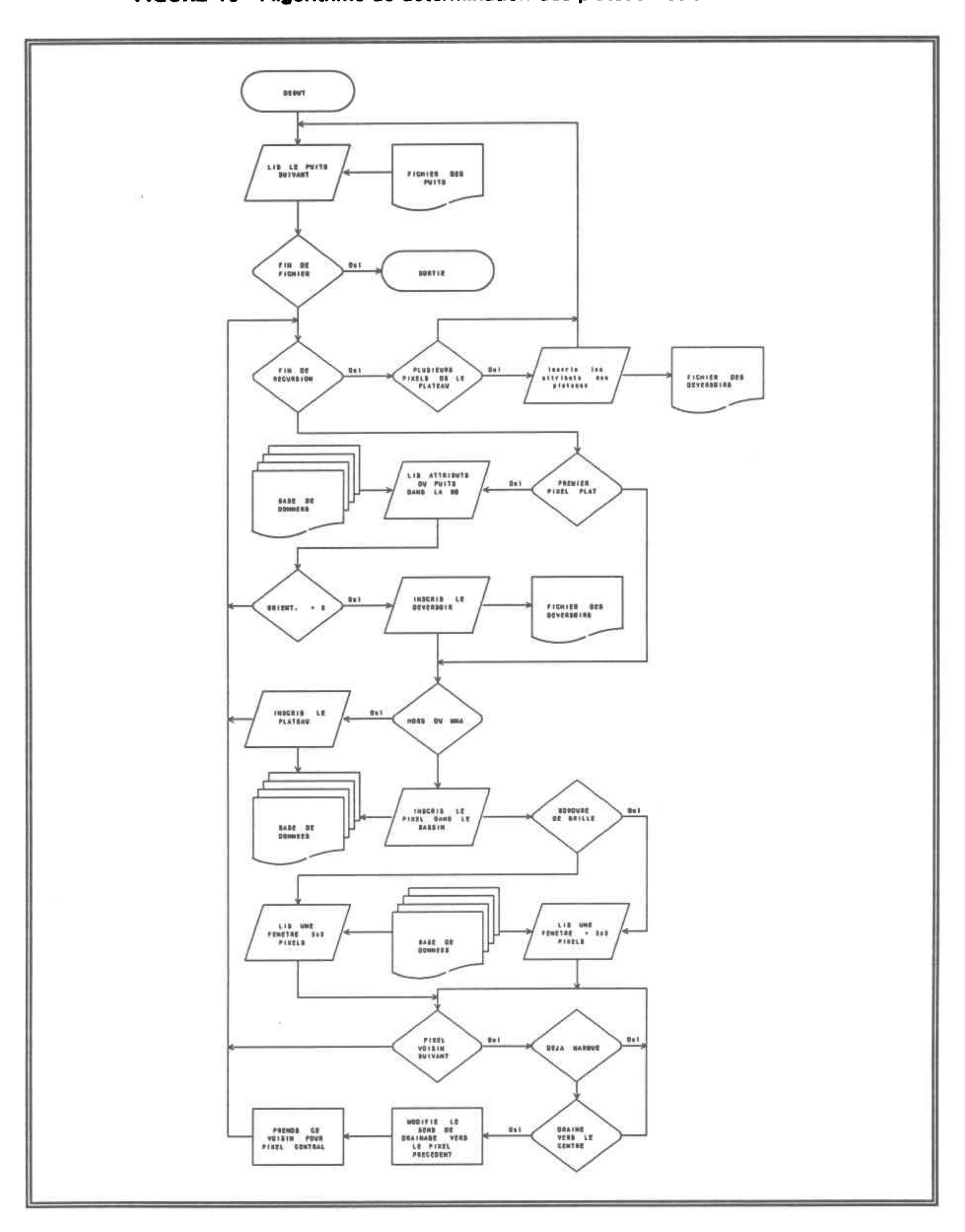
La boucle "while" de la fonction DEVERSOIR lit les coordonnées du carreau plat à traiter dans le fichier des puits (ligne 1), initialise les valeurs des paramètres (lignes 3 à 9) et fait appel à la fonction LOCDEV (ligne 10) qui va délimiter le plateau et le drainer vers le puits. DEVERSOIR reprend la commande pour inscrire le numéro de séquence du plateau traité, les coordonnées du puits, la superficie du plateau et les coordonnées du rectangle qui le circonscrit (ligne 12).

```
if (temoin = = 0)
    {
    off = ((long)ligne * (nc + 1L) + col) * sizeof(PIX);
    fseek (in1, off, SEEK_SET);
    fread ((char *)&test, sizeof(PIX), 1, in1);
    fseek (in1, - (long)sizeof(PIX), SEEK_CUR);
    if (test.sens)  return(0);
    else
        {
        value.lig + = 1;
        value.col + = 1;
        fwrite ((char *)&value, sizeof(PLC), 1, out1);
        }
    }
temoin+ +;
if (ligne < 0 || col < 0 ||  ligne > nl || col > nc)  return(0);
fwrite ((char *)&seq, sizeof(short), 1, in1);
fseek (in1, -(long)sizeof(short), SEEK_CUR);
i1 = 0;
fseek (in1, (long)ddc * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
for(dl = ddl; dl < = mdl; dl+ +)
    {
    i1 = (ddl) ? dl + 1 : dl;
    fseek (in1, (long)dl * (nc + 1L) * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
    nread = fread ((char *)kern[i1], sizeof(PIX), (mdc - ddc + 1), in1);
    fseek (in1, -((long)dl * (nc + 1L)+ mdc - ddc + 1L) * sizeof(PIX),
    SEEK_CUR);
    }
fseek (in1, -(long)ddc * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
for (dl = ddl; dl < = mdl; dl+ +)
    {
    l = ligne + dl;
    lr = ll + dl;
    dlb = dl + 1;
    for (dc = ddc; dc < = mdc; dc+ +)
        {
        c = col + dc;
        cr = cl + dc;
        dcb = dc + 1;
        if (kern[lr][cr].bas = = 0 && kern[lr][cr].sens = = 0)
            {
            fseek (in1, ((long)dl * (nc + 1L) + dc) * sizeof(PIX),
            SEEK_CUR);
            if (kern[lr][cr].sens != drain[dlb][dcb])
```

```
45                  {
46                  kern[lr][cr].sens = drain[dlb][dcb];
47                  fseek (in1, 2L * sizeof(short), SEEK_CUR);
48                  fwrite ((char *)&drain[dlb][dcb], sizeof(short), 1, in1);
49                  fseek (in1, -3L * sizeof(short), SEEK_CUR);
50                  }
51              locdev (l,c);
52              fseek (in1, - ((long)dl * (nc + 1L) + dc) * sizeof(PIX),
53              SEEK_CUR);
54      } } }
```

Les lignes 1 à 7 de LOCDEP vérifient si le puits aurait déjà été traité: Si oui, elle retourne la commande à DEVERSOIR pour passer au traitement du puits suivant. Sinon, l'instruction des lignes 10 à 12 inscrit les coordonnées du puits dans le fichier des déversoirs. Les instructions des lignes suivantes délimitent le masque du plateau dans la base de données et le drainent artificiellement vers le puits à l'aide d'un algorithme récursif. L'algorithme teste tous les carreaux du voisinage qui sont connectés (directement ou indirectement) au puits considéré par un carreau plat. L'instruction de la ligne 17 inscrit le numéro séquentiel du plateau comme attribut à chacun des carreaux du plateau.

FIGURE 40 Algorithme de détermination des plateaux et des déversoirs



I. Le programme de traitement des dépressions "DEPRESSION"

Le programme **DEPRESSION** (figures 41 et 42) délimite le contour des dépressions autour des puits du MNA et les déverse dans la direction appropriée. le programme permet aussi de calculer le réseau de drainage cumulé dans les dépressions. Les calculs se font directement sur la base de données des attributs des pixels. Le masque des dépressions et leur réseau de drainage sont inscrits dans la base des données à l'emplacement du masque et du réseau de drainage du bassin. Il faudrait les extraire et les placer dans des fichiers séparés pour pouvoir les exploiter. Les programmes utilitaires auxiliaires EXT_BAS et EXTR_RES ont été développés pour ce faire.

En plus de la fonction principale MAIN, le programme DEPRESSION contient six fonctions: INIT, COOR_UTM_NO, LOCDEP, EXUDEP, DEPRESSE, et DEVERSOIR. Nous avons déjà expliqué le fonctionnement de COOR_UTM_NO. Nous donnerons, ci-après, des extraits de programmes des autres fonctions et leur description sommaire.

```
1   for ( ; ; )
2       {
3       tread -= nread;
4       printf ("%8lu\b\b\b\b\b\b\b\b", (tread >= 0L) ? tread : tread - tread);
5       nread = fread ((char *)buf, sizeof(PIX), (size_t)bufsize, in1);
6       if (nread <= 0)
7           return(-1);
8       fgetpos (in1, &pos);
9       for (i=0; i < (size_t)nread; i++)
10          {
11          buf[i].bas = 0;
12          buf[i].res = 1;
13          }
14      fseek(in1, -(nread * sizeof(PIX) ), SEEK_CUR);
15      fwrite((char *)buf, sizeof(PIX), (size_t)nread, in1);
16      fsetpos(in1, &pos);
17      }
```

L'extrait ci-dessus provient de la fonction INIT. L'instruction de la ligne 5 lit un segment de fichier de la base de données. L'instruction de la ligne 8 relève la position

du pointeur de lecture. Les lignes 9 à 13 initialisent le masque et le réseau de drainage dans la mémoire tampon. La ligne 14 place le pointeur d'écriture au début du segment de fichier dans la base de données. La ligne 15 transfère le contenu de la mémoire tampon à la base de données.

```
 1  init (in1, dim_lc);
 2  rewind (in1);
 3  fprintf (out2,"Nombre de dépressions:  %5ld\n\n", dim_lc[0]);
 4  fprintf (out2, " depr#  d_de  l_de  c_de  a_de  l_NO  c_NO  ");
 5  fprintf (out2, "l_SE  c_SE      Easting    Northing\n\n") ;
 6  nc = (int)dim_lc[1] - 1;
 7  nl = (int)dim_lc[0] - 1;
 8  printf ("\nNuméro du déversoir traité:  ");
 9  fseek (in2, entete, SEEK_SET);
10  while ( (fread( (char *)&value, sizeof(PLC), 1, in2) != 0))
11      {
12      value.lig -= 1;
13      value.col -= 1;
14      ++ndep;
15      temoin = 0;
16      for (i = 0; i < 2 ;i++)  coor[i] = 32767;
17      for(i = 2; i < 4 ;i++)   coor[i] = 0;
18      ncar = 0;
19      locdep (in1, out1, value.lig, value.col, &temoin, &ncar, &ndep, &nl,
20      &nc, dim_lc, coor);
21      if (temoin == 0 && ncar >= 1)
22          {
23          printf ("%4u\b\b\b\b", ++seq);
24          exudep (in1, out1, out2, &value, coor, &ndep, &nl, &nc, dim_lc);
25          for (i = 0; i < 3 ;i++)  coor[i] += 1;
26          fwrite ((char *)&value, sizeof(PLC), 1, out1);
27          coor_utm_no (utmco, utmc, ps, value.lig, value.col);
28          fprintf (out2," %5d %5d %5d %5d %5d %5d %5d %5d %5d
29          %12.2f %12.2f\n", seq, value.lig, value.col, value.cote, ncar,
30          coor[0], coor[1], coor[2], coor[3], utmc[1], utmc[0]);
31          }
32      }
33  printf("\nNombre de déversoirs traités  :  %d", ndep);
```

L'extrait ci-dessus provient de la fonction LOCDEP. L'instruction de la ligne 1 fait appel à la fonction INIT pour initialiser le masque et le réseau de drainage de la dépression dans la base de données. Les lignes 3 et 4 créent l'entête du fichier des

dépressions (nombre, numéro séquentiel, superficie, coordonnées de l'exutoire, coordonnées des carreaux extrêmes). La boucle "while" initialise les variables (lignes 12 à 19), fait appel à la fonction LOCDEP (ligne 19) qui délimite la dépression et, si celle-ci contient plusieurs carreaux, fait appel à la fonction EXUDEP (ligne 23) qui détermine son exutoire et son réseau de drainage (lignes 20 à 29). La ligne 25 inscrit les coordonnées des exutoires dans un fichier de type binaire. La ligne 26 inscrits les caractéristiques des dépressions dans un fichier de type ASCII.

LOCDEP fonctionne sur le même principe que LOCDEV pour délimiter la dépression. Après que toutes lea variables aient été déclarées et initialisées, c'est les deux boucles "for" suivantes qui accomplissent l'essentiel de la tâche.

```
for (dl = ddl; dl < = mdl; dl+ +)
    {
    i1 = (ddl = = -1) ? dl + 1 : dl;
    fseek (in1, dl * dim_lc[1] * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
    nread = fread((char *)kern[i1], sizeof(PIX), (mdc - ddc + 1), in1);
    fseek (in1, -(dl * dim_lc[1] + mdc - ddc + 1L) * sizeof(PIX),
    SEEK_CUR);
    }
fseek (in1, -(long)ddc * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
for (dl = ddl; dl < = mdl; dl+ +)
    {
    l = ligne + dl;
    lr = ll + dl;
    dlb = dl + 1;
    for (dc = ddc; dc < = mdc; dc+ +)
        {
        c = col + dc;
        cr = cl + dc;
        dcb = dc + 1;
        if (kern[lr][cr].bas = = 0 && ((kern[lr][cr].sens = = 0 &&
        kern[lr][cr].alt = = kern[ll][cl].alt) || kern[lr][cr].sens = =
        drain[dlb][dcb]))
            {
            fseek (in1, (dl * dim_lc[1] + dc) * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
            locdep (in1, out1, l, c, tem, ncr, ndp, nl, nc, dim_lc, coor);
            fseek (in1, -(dl * dim_lc[1] + dc) * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
            }
        }
    }
```

La première boucle (lignes 1 à 8) lit les attributs du déversoir considéré dans la base de données. La deuxième boucle (lignes 9 à 26) délimite la dépression en se basant sur les orientations ou sur les altitudes, si le carreau est plat. La boucle teste successivement les carreaux voisins. A chaque fois que l'un de ces voisins s'écoule vers le carreau central, l'algorithme prend ce carreau pour centre et réitère la récursion (ligne 23) jusqu'à ce que les huit voisins du déversoir, ou moins si le carreau se trouve en bordure de grille, soient passés en revue. Après que la dépression ait été délimitée, la fonction LOCDEP retourne le commande à la fonction DEPRESSE.

Lorsque la dépression contient plus d'un carreau, DEPRESSE fait appel à la fonction EXUDEP qui va déterminer l'exutoire de la dépression et son réseau de drainage.

```
1   while (tread > 0L)
2       {
3       fgetpos (in1, &pos);
4       for (i = 0; i < nal; i++)
5           {
6           fseek (in1, (long)cdl * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
7           if ((nread = fread(buf+i*n_c, sizeof(PIX), n_c, in1)) != 0)
8               {
9               tread -= (long)nread;
10              fseek (in1, ((long)(*nc) - cfl) * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
11              }
12          else  return (*extoir);
13          }
14      id = (coor[0]) ? 1 : 0;
15      it = (coor[2] - *nl) ? nal - 1 : nal;
16      for(i = id; i < it; i++)
17          {
18          jd = (coor[1]) ? 1 : 0;
19          jt = (coor[3] - (*nc)) ? n_c - 1 : n_c;
20          for (j = jd; j < jt; j++)
21              {
22              fen = buf[(i-1)*n_c+j-1].bas + buf[(i-1)*n_c+j].bas +
23              buf[(i-1)*n_c+j+1].bas + buf[i*n_c+j-1].bas +
24              buf[i*n_c+j+1].bas + buf[i*n_c+j].bas +
25              buf[(i+1)*n_c+j-1].bas + buf[(i+1)*n_c+j+1].bas +
26              buf[(i+1)*n_c+j].bas;
```

```
        if (( ((fen) && fen != *ndp * 9) && buf[i*n_c+j].bas ==
        *ndp) && buf[i*n_c+j].alt < exut)
            {
            exut = buf[i*n_c+j].alt;
            le = i;
            ce = j;
            }
        if (buf[i*n_c+j].sens == 0)
            {
            lex = i;
            cex = j;
            }
        }
    }
if (le != lex || ce != cex)
    {
    lex = le;
    cex = ce;
    v1 = le * n_c + ce;
    while (buf[le*n_c+ce].sens)
        {
        buf[le*n_c+ce].sens = (buf[le*n_c+ce].sens - 4 > 0) ?
        buf[le*n_c+ce].sens - 4 : buf[le*n_c+ce].sens + 4;
        l = le;
        c = ce;
        le += dep_l[buf[l*n_c+c].sens];
        ce += dep_c[buf[l*n_c+c].sens];
        }
    buf[le*n_c+ce].sens = buf[l*n_c+c].sens;
    buf[v1].sens = 0;
    }
exut = 32767;
le = ce = 1;
id = (lex == 0) ? 0 : -1;
jd = (cex == 0) ? 0 : -1;
it = (lex == n_l - 1) ? 0 : 1;
jt = (cex == n_c - 1) ? 0 : 1;
for (dl = id; dl <= it; dl++)
    {
    i = (lex + dl) * n_c;
    for (dc = jd; dc <= jt; dc++)
        {
        j = cex + dc;
        if (buf[i+j].bas == 0 && buf[i+j].alt < exut)
```

```
71                  {
72                  exut = buf[i+j].alt;
73                  le = dl + 1;
74                  ce = dc + 1;
75                  }
76              }
77          }
78      buf[lex*n_c+cex].sens = orient[le][ce];
79      extoir->cote = buf[lex*n_c+cex].alt;
80      extoir->lig = lex + ldl + 1;
81      extoir->col = cex + cdl + 1;
82      fsetpos(in1, &pos);
83      for (i = 0; i < nal; i++)
84          {
85          fseek (in1, (long)cdl * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
86          if ((fwrite(buf+i*n_c, sizeof(PIX), n_c, in1)) != 0)
87              fseek (in1, ((long)(*nc) - cfl) * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
88          else  exit(-6);
89          }
90      }
```

L'extrait ci-dessus provient de la fonction EXUDEP. Après avoir initialisé toutes les variables, EXUDEP détermine le réseau de drainage et l'exutoire de la dépression. C'est la boucle "while" illustrée ci-dessus qui fait l'essentiel des traitements. La première boucle "for" (lignes 4 à 13) lit les attributs des carreaux de la matrice de la dépression dans la base des données et renvoie les coordonnées de l'exutoire (ligne 12) à la fonction appelante DEPRESSE, après que toute la dépression ait été traitée. La deuxième boucle "for" (lignes 16 à 38) va chercher l'exutoire à la périphérie de la dépression. La boucle "if" (lignes 39 à 55) inverse le sens des écoulements des carreaux de la dépression, pour la drainer artificiellement vers l'exutoire et corrige les orientations des carreaux pour refléter le sens de l'écoulement. Le reste de la procédure (62 à 75) détermine les coordonnées (X, Y et H) de l'exutoire et inscrit les nouveaux attributs des carreaux dans la base de données.

FIGURE 41 Algorithme de traitement des dépressions

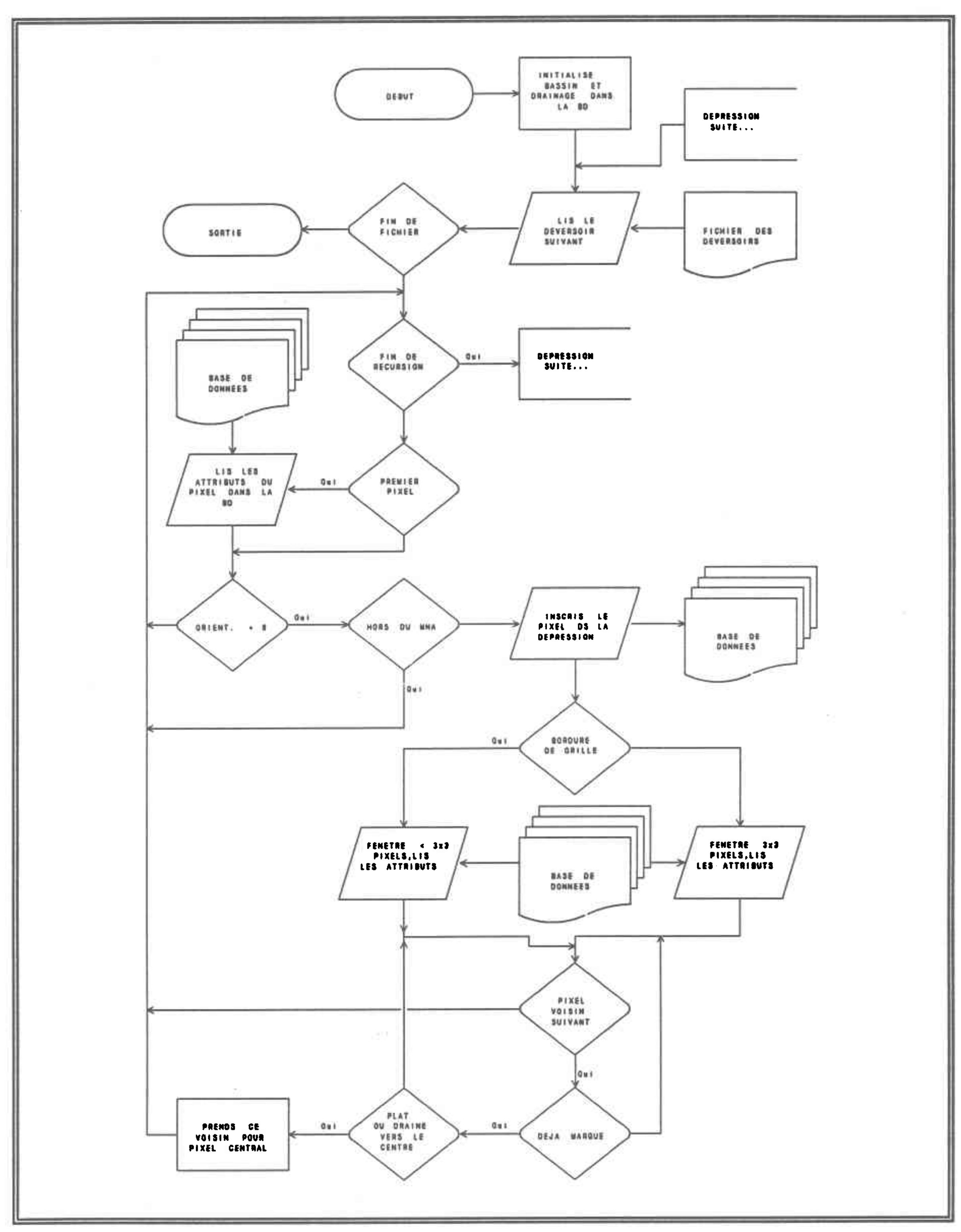
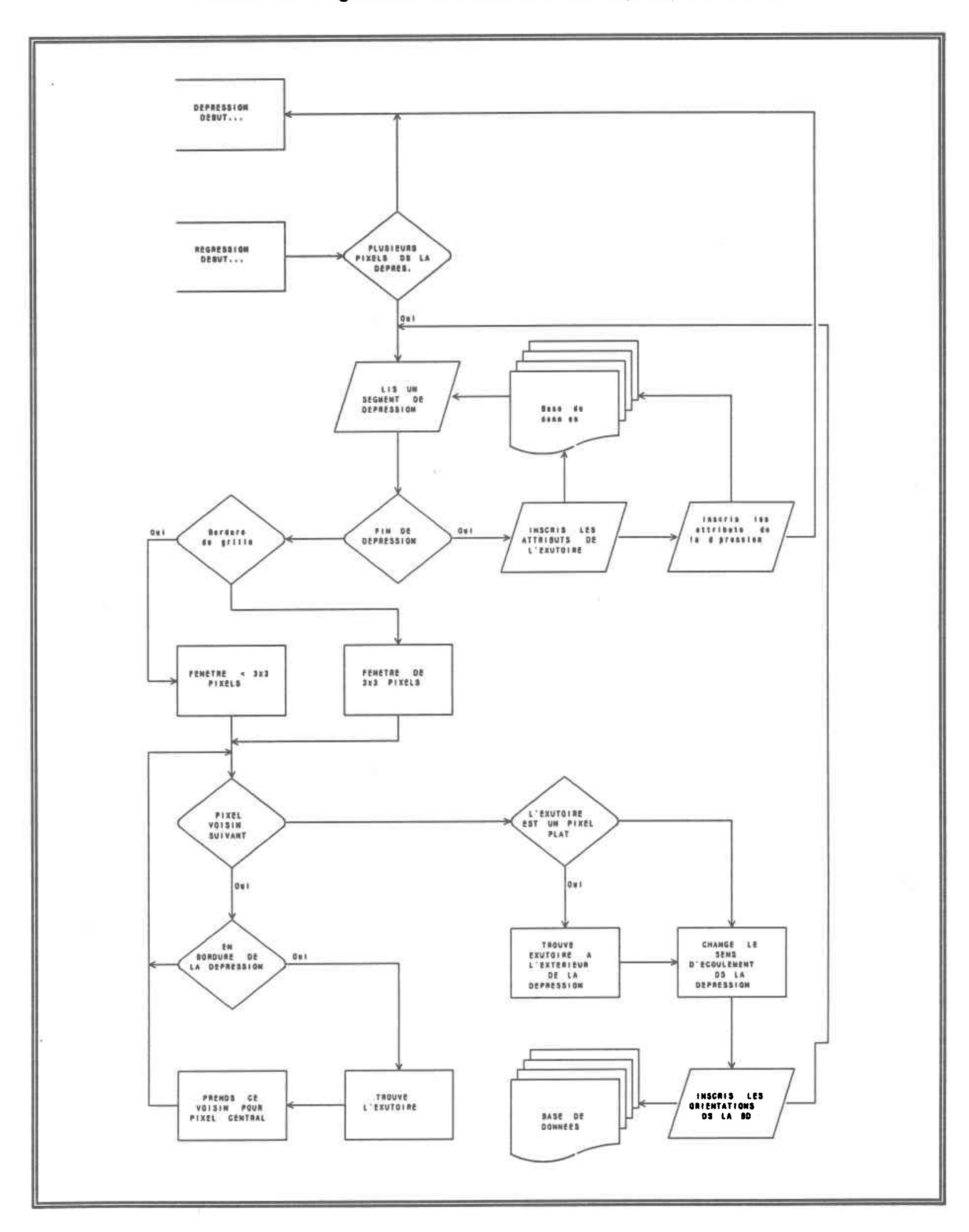


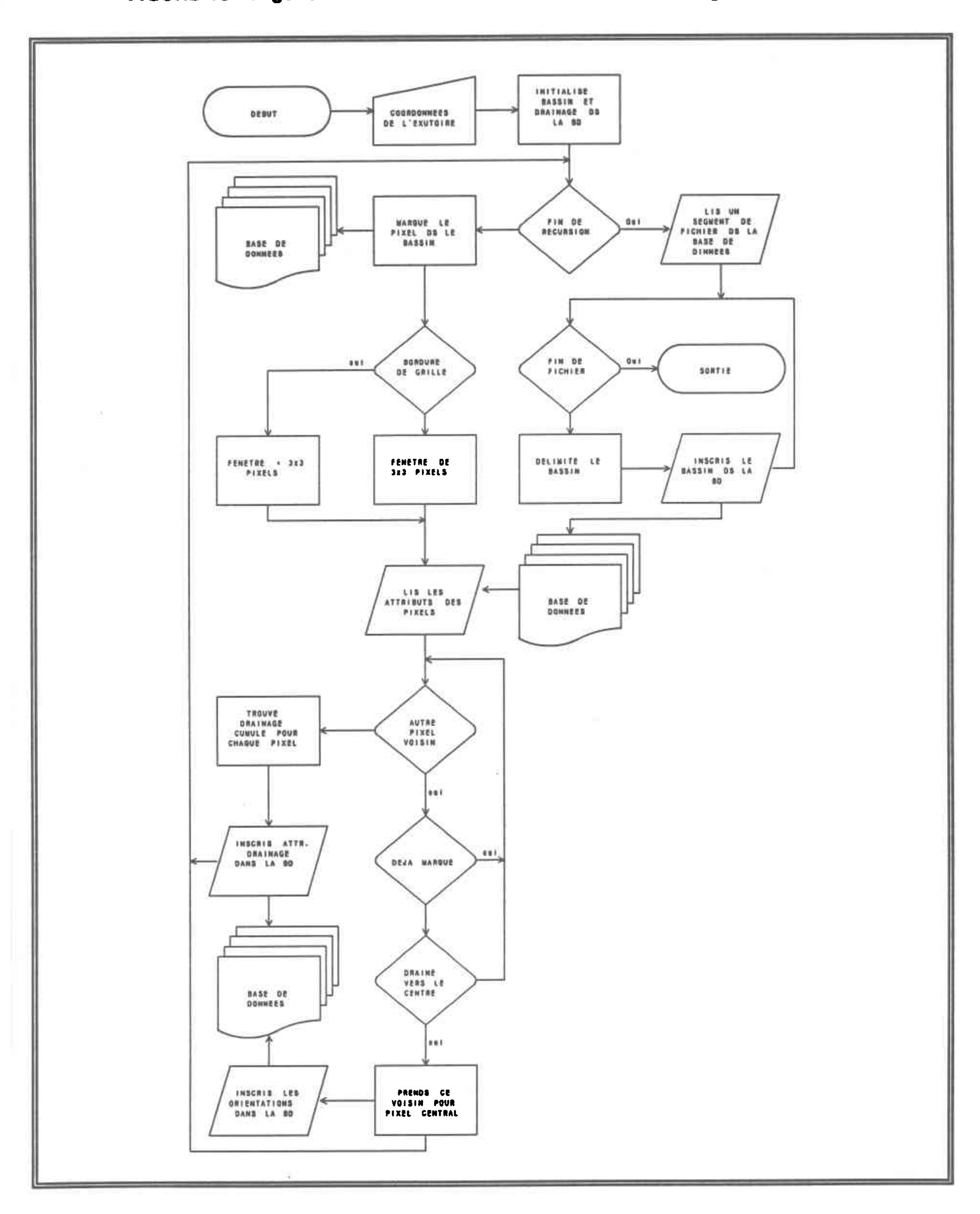
FIGURE 42 Algorithme de traitement des dépressions (suite)



m. Le programme de délimitation du masque du bassin et de détermination du réseau de drainage "DRAINE"

Le programme **DRAINE** (figure 43) calcule le réseau de drainage hiérarchisé et délimite le masque du bassin versant. Les calculs se font directement sur le fichier des caractéristiques des carreaux. Le programme comporte 4 fonctions en plus de la fonction principale MAIN. Ces fonctions sont INITRES_1, MASQUE, AVAL_AMONT, et DRAINAGE

FIGURE 43 Algorithme de détermination du réseau de drainage et du bassin



La fonction DRAINAGE vérifie d'abord si l'exutoire est bien à l'intérieur du MNA (ligne 1). Elle fait ensuite appel à la fonction INITRES_1 qui initialise les valeurs de l'attribut bassin à 0 et les valeurs de l'attribut réseau de drainage à 1 dans la base de données. DRAINAGE passe la commande à AVAL_AMONT qui détermine le bassin et trace le réseau de drainage (ligne 10). MASQUE arrive en dernier pour mettre à 0 la valeur de drainage des carreaux situés à l'extérieur du bassin. Comme résultat chaque carreau du bassin aura les attributs de drainage cumulé, et de son appartenance au bassin en plus des caractéristiques déterminées précédemment soit son altitude, son orientation et sa pente.

```
1   if (exu_lc[0] > = 1 && exu_lc[1] > = 1 && exu_lc[0] < =
2   (short)dim_lc[0] && exu_lc[1] < = (short)dim_lc[1])
3       {
4       initres_1 ();
5       exu_lc[0] -= 1;
6       exu_lc[1] -= 1;
7       off1 = ((exu_lc[0] * dim_lc[1] + exu_lc[1]) * sizeof(PIX));
8       fseek (in1, off1, SEEK_SET);
9       printf ("%-4d\b\b\b\b", exu_num);
10      aval_amont (exu_lc[0], exu_lc[1], &exu_num);
11      rewind (in1);
12      masque ();
13      }
```

C'est la boucle "for" de la fonction INITRES_1 illustrée ci-dessus qui lit le fichier de la base de données (ligne 3), met à 0 la valeur d'appartenance au bassin (ligne 8) et à 1 la valeur de drainage (ligne 9) de chaque carreau du MNA.

```
1   for ( ; ; )
2       {
3       nread = fread ((char *)buf, sizeof(PIX), bufsize, in1);
4       if (nread < = 0) break;
5       fgetpos (in1, &pos);
6       for (i = 0; i < nread; i+ +)
7           {
8           buf[i].bas = 0;
9           buf[i].res = 1;
10          }
11      fseek (in1, -(long)nread * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
12      fwrite ((char *)buf, sizeof(PIX), nread, in1);
```

```
fsetpos (in1, &pos);
}
```

La fonction AVAL_AMONT, après l'initialisation des variables et les vérifications d'usage de bordure de grille, procède à la détermination du bassin versant. Elle commence par inscrire l'exutoire dans le bassin. Dans l'extrait du programme de la fonction AVAL_AMONT illustré ci-dessous, la première boucle "for" (lignes 9 à 36) va trouver successivement et de façon récursive (ligne 32) tous les carreaux qui drainent vers l'exutoire. L'algorithme procède d'aval en amont, jusqu'à ce qu'il visite tous les carreaux du bassin. Il retient en mémoire la valeur du drainage cumulé de chacun de ces carreaux. Quand il retourne d'amont en aval, il inscrit le drainage cumulé des carreaux du bassin dans la base de données (lignes 37 à 50).

```
1   for (dl = ddl; dl <= mdl; dl++)
2       {
3       i1 = (ddl) ? dl + 1 : dl;
4       fseek (in1, (long)dl * dim_lc[1] * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
5       fread ((char *)kern[i1], sizeof(PIX), (mdc - ddc + 1), in1);
6       fseek (in1, -((long)dl * dim_lc[1] + mdc - ddc + 1L) * sizeof(PIX),
7       SEEK_CUR);
8       }
9   fseek (in1, -(long)ddc * sizeof(PIX), SEEK_CUR);
10  for (dl = ddl; dl <= mdl; dl++)
11      {
12      l = ligne + dl;
13      lr = ll + dl;
14      for (dc = ddc; dc <= mdc; dc++)
15          {
16          c = col + dc;
17          cr = cl + dc;
18          if (kern[lr][cr].bas != *pbas && (kern[lr][cr].sens ==
19          drain[dl+1][dc+1] || kern[lr][cr].sens == 0))
20              {
21              fseek (in1, ((long)dl * dim_lc[1] + dc) * sizeof(PIX),
22              SEEK_CUR);
23              if (kern[lr][cr].sens != drain[dl+1][dc+1])
24                  {
25                  kern[lr][cr].sens = drain[dl+1][dc+1];
26                  fseek (in1, 2L * sizeof(short), SEEK_CUR);
27                  fwrite ((char *)&drain[dl+1][dc+1], sizeof(short), 1, in1);
28                  fseek (in1, -3L * sizeof(short), SEEK_CUR);
```

```
                    }
                pix = 1;
                fseek (in1, (long)sizeof(short), SEEK_CUR);
                fwrite ((char *)&pix, sizeof(short), 1, in1);
                fseek (in1, -2L * sizeof(short), SEEK_CUR);
                aval_amont (l, c, pbas);
                fseek (in1, - ((long)dl * dim_lc[1] + dc) * sizeof(PIX),
                SEEK_CUR);
                }
            }
        }
    lc = 1 + res_l[kern[ll][cl].sens];
    cc = 1 + res_c[kern[ll][cl].sens];
    fseek (in1, (long)sizeof(short), SEEK_CUR);
    fread ((char *)&pix, sizeof(short), 1, in1);
    fseek (in1, -2L * sizeof(short), SEEK_CUR);
    ncar = kern[lc][cc].res + pix;
    fseek (in1, (((long)lc - 1L) * dim_lc[1] + cc - 1L) * sizeof(PIX),
    SEEK_CUR);
    fseek (in1, (long)sizeof(short), SEEK_CUR);
    if (ligne == exu_lc[0] && col == exu_lc[1])
        fwrite ((char *)&kern[lc][cc].res, sizeof(short), 1, in1);
    else
        fwrite ((char *)&ncar, sizeof(short), 1, in1);
    fseek (in1, -2L * sizeof(short), SEEK_CUR);
    fseek (in1, - (((long)lc-1L) * dim_lc[1] + cc - 1L) * sizeof(PIX),
    SEEK_CUR);
```

L'extrait de la fonction "MASQUE" illustré ci-dessous lit les attributs des carreaux dans la base de données (ligne 3) et met à 0 la valeur de drainage des carreaux extérieurs au bassin (ligne 9).

```
 1  for ( ; ; )
 2      {
 3      nread = fread ((char *)buf, sizeof(PIX), bufsize, in1);
 4      if (nread <= 0)  break;
 5      fgetpos (in1, &pos);
 6      for (i = 0; i < nread; i++)
 7          {
 8          if (buf[i].bas == 0)
 9              buf[i].res = 0;
10          }
11      fseek (in1, -(long)nread*sizeof(PIX), SEEK_CUR);
```

```
fwrite ((char *)buf, sizeof(PIX), nread, in1);
fsetpos (in1, &pos);
}
```

4. Les programmes auxiliaires

Plusieurs programmes auxiliaires ont été développés pour exploiter la base des données physiographiques: interfacer PHYSITEL et HYDROTEL, PHYSITEL et le système d'analyse d'image ARIES III de DIPIX; pour extraire les caractéristiques physiques de cette base et les présenter sous forme de fichiers séparés utilisables par d'autres programmes; pour ajouter ou modifier des valeurs dans les fichiers; pour extraire des parties de fichier; et pour créer des fichiers. Nous nous contenterons de les énumérer et de mentionner leur utilité sans entrer dans le détail.

- **VAXAT** permet de lire en tout ou en partie les fichiers du MNT d'entier de 16 bits du système VAX VMS produit par l'USGS et de créer un fichier d'entiers de 16 bits compatible au système DOS utilisable par PHYSITEL.

- **LECTRES** permet d'extraire, en tout ou en partie, le réseau de drainage de la base de données physiographique et de les imprimer sur un fichier séparé ou de l'afficher à l'écran.

- **LECTORI** permet d'extraire, en tout ou en partie, la matrice des orientations des carreaux du bassin versant de la base de données et de l'imprimer sur un fichier séparé ou de l'afficher à l'écran.

- **LECTBAS** permet de d'imprimer sur papier et sur disque, ou d'afficher à l'écran en tout ou en partie la matrice du masque du bassin versant à partir de la base de données.

- **LECTPIX** permet de lire les caractéristiques du bassin versant, soit le masque, le drainage, l'orientation de la pente, la tangente de la pente et l'altitude, dans la base de données.

- **LECTENT** permet de lire et d'imprimer a l'écran un fichier d'entiers en tout ou en partie.

- **LECTVAX** permet de sauter l'entête d'un fichier en 16 bits du VAX et de lire les donnée.

- **LECTCHR** permet de lire un fichier de caractères ASCII VAX obtenu par transfert du fichier du MNA du système DIPIX à VAX (tâche DA option: sans entête) et de l'imprimer a l'écran.

- **EXTR_RES** permet d'extraire le fichier du réseau de drainage à partir de la base de données pour transfert sur le système ARIES III.

- **EXTR_PEN** permet d'extraire le fichier des pentes à partir de la base de données.

- **EXTR_ORI** permet d'extraire le fichier des orientations à partir de la base de données.

- **EXTR_BAS** permet d'extraire le fichier des bassins à partir de la base de données.

- **PCVAXR** permet de transformer les fichiers d'entiers en fichiers de caractères pour transfert au système ARIES III de DIPIX. Le fichier d'entrée est un fichier binaire et le fichier de sortie est un fichier ASCII.

- **MANORDB** est similaire au programme MANOR, sauf qu'il utilise directement la base de données comme fichier d'entrée et de sortie.

- **LPUIT_DB** permet de localiser les puits directement dans la base de données. Le fichier d'entrée est le fichier panier et le fichier de sortie est le fichier des puits.

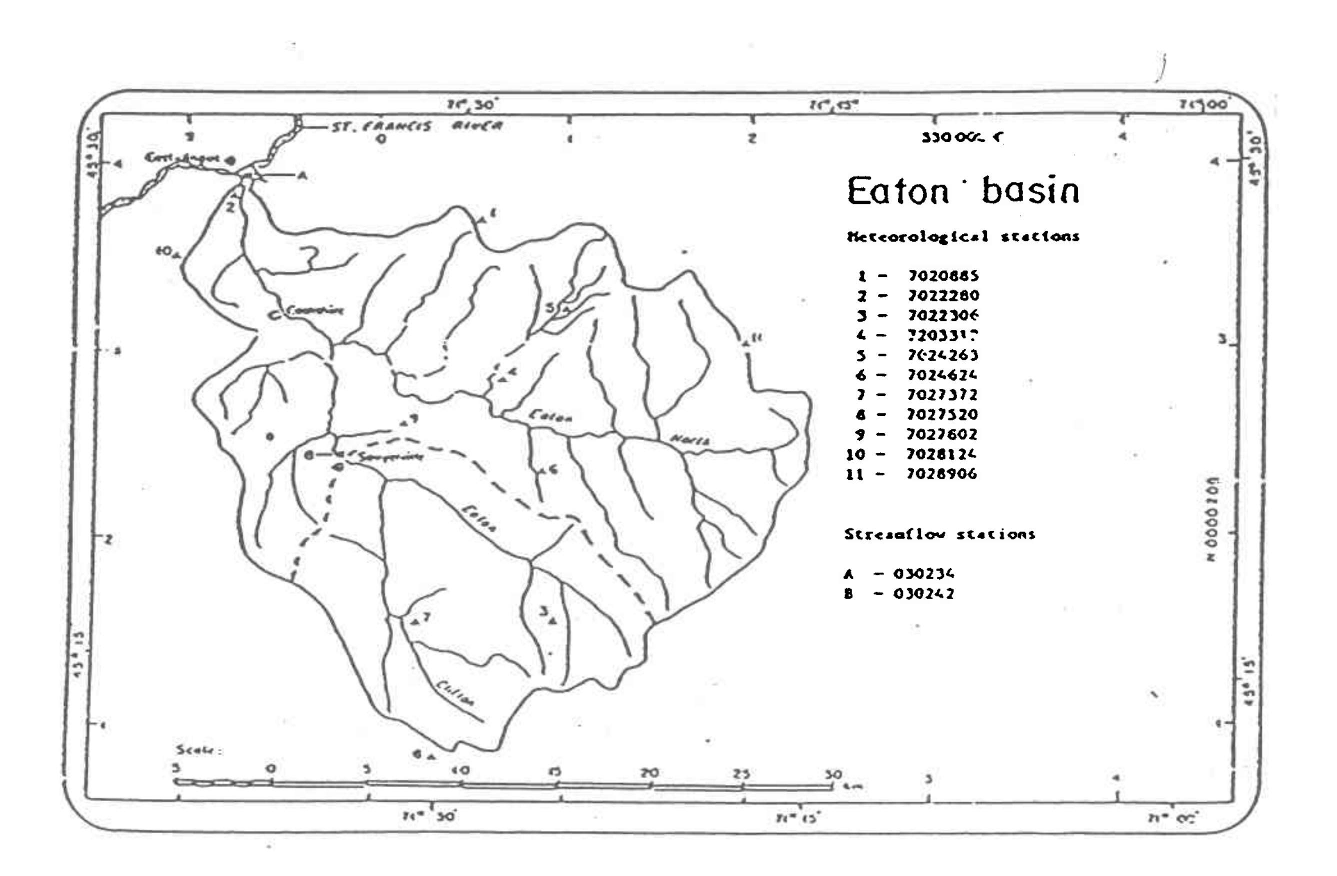
- **TRIPUITD** permet de trier les puits par ordre d'altitudes décroissantes. Le fichier d'entrée est le fichier des puits, le fichier de sortie est le fichier des puits triés.

Les listings de ces programmes sont fournis en annexe. Nous avons regroupé les plus utiles parmi ces programmes (lecture, affichage, création et modification de fichiers) sous forme d'un utilitaire interactif pour faciliter l'accès aux données et résultats de PHYSITEL.

E. Le bassin test

Pour tester le modèle PHYSITEL, nous avons utilisé le MNA du bassin de la rivière Eaton (figure 44).

FIGURE 44 Situation géographique du bassin test de la rivière Eaton



La rivière Eaton est un tributaire de la rivière St-François. La portion de bassin étudiée a une superficie évaluée à 250 km^2. L'altitude de la portion de bassin varie entre 260 mètres et 560 mètres, ce qui représente une dénivellation de 300 mètres. Les principaux tributaires sont la Eaton Nord et la rivière Clifton. La partie en aval du bassin versant présente une pente relativement faible, offrant l'aspect d'une plaine. les forêts occupent environ 70% de la surface étudiée.

Pour obtenir le MNA nous avons numérisé une matrice de 30 km x 30 km à partir d'une carte topographique au 1:250 000 avec une résolution de 1 km x 1km (tableau 3). Le fichier créé est de type entier où chaque valeur représente l'altitude d'un élément de base.

TABLEAU 3 Modèle numérique d'altitude source

316	318	316	308	292	284	275	243	267	259	251	259	324	356	365	381	373	405	437	462	460	455	510	502	488	518	510
319	324	319	318	314	308	300	251	284	300	258	284	308	326	324	340	356	389	421	461	463	452	470	462	455	486	478
332	326	340	332	330	332	306	253	292	316	292	261	275	277	275	277	332	358	390	437	454	413	421	437	421	454	462
327	356	365	350	348	334	300	274	300	324	332	348	326	324	332	316	275	316	324	379	381	382	356	397	389	423	463
358	373	374	373	356	316	284	275	301	322	363	365	363	365	389	381	332	300	292	300	308	309	316	332	356	373	421
371	389	387	379	348	299	301	278	276	308	340	366	373	381	411	413	389	373	371	356	358	405	421	431	429	397	389
356	373	381	373	340	324	340	308	292	290	300	340	348	374	415	421	415	381	389	413	389	403	460	454	478	462	421
374	324	405	379	348	342	356	363	356	324	301	308	308	330	389	420	437	446	462	454	403	423	462	480	488	486	423
373	381	413	411	373	365	373	397	387	340	308	356	373	332	334	390	429	454	486	502	455	446	461	486	501	510	470
340	365	421	423	405	389	381	405	389	356	309	365	397	395	348	350	397	452	484	488	504	486	462	478	502	525	488
342	381	429	454	437	421	407	413	390	365	316	373	403	407	405	373	351	395	405	462	518	535	470	471	501	527	518
348	397	437	438	444	446	436	429	405	381	324	374	405	429	431	397	389	381	387	429	494	502	494	484	494	525	591
373	399	403	413	454	470	444	436	413	389	332	381	413	421	462	455	454	437	413	415	437	454	486	533	518	520	599
389	404	405	415	446	447	437	429	397	390	348	373	397	437	486	510	518	446	470	545	446	447	462	535	583	551	567
429	437	446	438	429	433	436	462	454	405	355	356	381	421	478	512	527	478	494	496	486	494	454	543	608	575	606
413	439	455	444	437	435	437	452	446	421	407	363	365	429	486	518	510	509	527	525	526	518	520	486	598	599	559
373	429	454	437	429	421	446	454	455	454	411	413	381	415	446	478	504	567	569	559	527	583	599	601	583	608	535
371	421	428	431	413	430	439	454	470	494	437	454	415	420	470	480	502	583	608	597	591	616	640	638	551	606	518
356	389	397	399	405	439	454	478	470	496	470	478	452	421	454	486	527	616	633	616	598	599	664	600	543	575	535
340	324	356	381	421	462	478	486	488	502	504	502	488	470	462	488	551	632	630	599	575	583	672	608	535	551	543
389	381	326	382	429	460	470	471	484	486	501	494	510	518	559	567	585	583	608	609	569	567	648	664	551	510	501
421	390	373	359	389	421	437	446	462	463	470	462	478	551	599	583	582	535	569	575	576	543	624	656	648	567	502
429	407	405	390	356	373	381	389	413	429	437	492	518	583	632	591	559	527	518	567	544	567	648	616	583	565	501
437	439	446	421	397	429	405	454	421	413	431	470	527	591	630	608	575	510	494	566	527	632	682	679	535	510	518
486	471	470	454	413	428	460	462	463	454	452	454	502	535	590	632	598	551	486	502	518	648	680	608	551	486	551
518	496	494	492	455	429	478	502	510	518	455	518	591	518	551	599	593	590	543	487	543	672	682	640	520	502	575
510	536	535	502	468	470	471	551	583	520	551	614	608	535	504	559	575	559	551	502	608	650	648	583	494	518	591
518	549	551	552	518	527	486	582	583	517	543	616	599	567	454	502	567	502	494	527	632	664	543	551	484	608	616
502	535	583	608	583	551	616	552	583	510	518	583	608	575	439	486	543	541	488	551	648	624	583	502	486	583	664

Nous avons corrigé le MNA pour les extremums (minimums et maximums (tableau 4)

TABLEAU 4 Modèle numérique d'altitude corrigé pour les puits et les sommets

316	318	316	308	292	284	275	243	267	259	251	259	324	356	365	381	373	405	437	462	460	455	510	502	488	518	510
319	324	319	318	314	308	300	251	284	300	258	284	308	326	324	340	356	389	421	461	462	452	470	462	455	486	478
332	326	340	332	330	332	306	253	292	316	292	261	275	277	277	277	332	358	390	437	454	413	421	437	421	454	462
327	356	365	350	348	334	300	274	300	324	332	348	326	324	332	316	277	316	324	379	381	382	356	397	389	423	463
358	373	374	373	356	316	284	275	301	322	363	365	363	365	389	381	332	300	300	300	308	309	316	332	356	373	421
371	387	387	379	348	299	301	278	276	308	340	366	373	381	411	413	389	373	371	356	358	405	421	431	429	397	389
356	373	381	373	340	324	340	308	292	290	300	340	348	374	415	421	415	381	389	413	389	403	460	454	478	462	421
374	356	405	379	348	342	356	363	356	324	301	308	308	330	389	420	437	446	462	454	403	423	462	480	488	486	423
373	381	413	411	373	365	373	397	387	340	308	356	373	332	334	390	429	454	486	502	455	446	461	486	501	510	470
340	365	421	423	405	389	381	405	389	356	309	365	397	395	348	350	397	452	484	488	504	486	462	478	502	525	488
342	381	429	444	437	421	407	413	390	365	316	373	403	407	405	373	351	395	405	462	518	518	470	471	501	527	518
348	397	437	438	444	446	436	429	405	381	324	374	405	429	431	397	389	381	387	429	494	502	494	484	494	525	591
373	399	403	413	454	454	444	436	413	389	332	381	413	421	462	455	454	437	413	415	437	454	486	533	518	520	599
389	404	405	415	446	447	437	429	397	390	348	373	397	437	486	510	518	446	470	496	446	447	462	535	583	551	567
429	437	446	438	429	433	436	454	454	405	355	356	381	421	478	512	518	478	494	496	486	494	454	543	599	575	606
413	439	454	444	437	435	437	452	446	421	407	363	365	429	486	518	510	509	527	525	526	518	520	486	598	599	559
373	429	454	437	429	421	446	454	455	454	411	413	381	415	446	478	504	567	569	559	527	583	599	601	583	606	535
371	421	428	431	413	430	439	454	470	494	437	454	415	420	470	480	502	583	608	597	591	616	640	638	551	606	518
356	389	397	399	405	439	454	478	470	496	470	478	452	421	454	486	527	616	632	616	598	599	664	600	543	575	535
340	326	356	381	421	462	478	486	488	502	502	502	488	470	462	488	551	632	630	599	575	583	664	608	535	551	543
389	381	326	382	429	460	470	471	484	486	501	494	510	518	559	567	585	583	608	609	569	567	648	664	551	510	501
421	390	373	359	389	421	437	446	462	463	470	462	478	551	599	583	582	535	569	575	576	544	624	656	648	567	502
429	407	405	390	359	373	381	389	413	429	437	492	518	583	630	591	559	527	518	567	544	567	648	616	583	565	502
437	439	446	421	397	429	405	454	421	413	431	470	527	591	630	608	575	510	494	566	527	632	680	679	535	510	518
486	471	470	454	413	428	460	462	463	454	452	454	502	535	590	630	598	551	487	502	518	648	680	608	551	502	551
518	496	494	492	455	429	478	502	510	518	455	518	591	518	551	599	593	590	543	487	543	672	680	640	520	502	575
510	536	535	502	468	470	471	551	583	520	551	614	608	535	504	559	575	559	551	502	608	650	648	583	494	518	591
518	549	551	552	518	527	486	582	583	517	543	614	599	567	454	502	567	502	494	527	632	650	543	551	486	608	616
502	535	583	583	583	551	591	552	583	510	518	583	608	575	439	486	543	541	488	551	648	624	583	502	486	583	664
486	510	567	543	575	559	591	551	567	527	486	551	616	567	437	518	502	575	486	535	656	599	565	494	484	543	640

Le tableau 5 suivant donne la liste de extremums qui ont été corrigés.

TABLEAU 5 Liste des extremums

a Liste des maximums

N°	LIG	COL	ALT
1	2	21	463
2	6	2	389
3	11	4	454
4	11	22	535
5	13	6	470
6	14	20	545
7	15	8	462
8	15	17	527
9	15	25	608
10	15	28	640
11	16	3	455
12	17	26	608
13	19	19	633
14	20	11	504
15	20	23	672
16	23	15	632
17	24	23	682
18	25	16	632
19	26	23	682
20	28	12	616
21	28	22	664
22	29	4	608
23	29	7	616
24	29	28	729

b Liste des minimums

N°	LIG	COL	ALT
1	3	15	275
2	4	17	275
3	5	19	292
4	8	2	324
5	18	28	502
6	20	2	324
7	21	28	406
8	22	22	543
9	23	5	356
10	23	27	501
11	25	19	486

Nous avons ensuite filtré le MNA (tableau 6).

TABLEAU 6 Modèle numérique d'altitude filtré

323	321	318	313	306	291	264	279	289	268	281	302	320	325	338	357	387	419	451	456	453	464	463	462	480	481	480
331	338	334	330	325	300	270	290	307	296	282	290	293	295	298	329	355	388	424	438	418	421	430	429	451	465	484
353	359	351	344	328	299	281	298	320	329	335	325	325	329	320	302	320	336	370	378	375	366	388	394	420	453	492
370	373	368	350	318	291	282	298	321	351	359	360	364	378	370	338	317	319	323	332	336	345	358	375	390	421	442
380	382	373	346	312	302	287	286	309	336	358	368	380	402	404	384	366	362	355	360	388	406	419	420	406	404	415
374	381	372	344	329	331	314	302	301	311	335	348	372	404	416	412	395	398	405	395	409	447	456	466	451	428	446
369	394	380	355	347	354	357	347	323	310	318	326	344	383	412	429	439	452	446	419	428	457	477	485	478	446	473
381	404	404	378	368	374	387	377	341	320	345	361	346	351	389	424	452	478	485	459	451	463	483	498	499	476	481
375	414	420	406	392	388	399	386	353	327	360	387	385	360	364	398	439	470	483	494	483	469	480	501	514	495	494
383	422	437	432	420	411	409	391	362	335	368	398	405	398	378	371	400	420	463	502	505	478	478	501	522	522	519
393	425	435	442	442	434	424	404	374	343	371	403	423	425	406	396	392	401	435	481	493	492	490	502	529	569	566
397	408	421	446	449	442	430	410	382	350	376	407	427	454	455	449	434	422	431	448	462	487	520	523	536	584	604
407	412	422	441	444	439	431	409	388	359	372	398	435	475	498	498	460	465	477	456	456	477	529	565	560	577	606
430	438	436	433	435	438	446	439	404	369	364	386	427	477	508	509	488	494	496	489	488	478	535	580	579	593	601
435	448	442	435	434	439	450	445	423	401	373	379	425	475	505	510	515	526	524	524	521	526	524	585	591	570	579
424	445	437	430	427	443	452	455	449	420	408	395	420	454	484	511	553	565	559	546	575	588	589	585	588	549	548
411	424	426	418	430	443	456	470	476	448	443	422	426	460	482	515	575	600	593	589	608	628	618	572	581	535	528
382	394	401	413	438	456	473	477	488	476	472	454	437	458	488	534	600	622	610	597	608	642	603	561	562	537	530
346	363	385	420	454	472	480	486	495	497	495	485	476	478	505	556	612	621	602	583	596	641	609	554	544	528	510
372	348	380	419	450	464	470	480	485	493	492	503	517	545	559	576	585	600	598	574	581	632	640	571	529	506	464
391	376	370	392	417	432	442	455	462	470	474	497	550	587	584	574	551	567	573	571	568	620	641	619	557	511	525
412	404	391	377	387	399	408	423	433	446	483	519	575	612	593	562	534	530	557	556	582	636	625	589	555	520	549
441	439	419	402	415	414	439	428	425	440	473	523	578	613	605	573	524	511	543	547	617	660	646	556	523	531	570
472	467	451	425	431	454	463	464	456	457	473	514	548	587	612	590	550	508	511	544	633	667	616	555	517	553	617
499	495	483	455	442	474	500	509	507	483	523	563	535	554	588	588	574	536	509	558	648	662	618	535	519	574	635
529	528	505	480	474	486	539	560	527	544	588	590	542	519	551	568	556	538	525	595	638	634	578	520	533	594	646
541	550	546	524	521	512	565	568	532	548	597	594	554	486	509	550	521	510	542	615	633	572	545	513	581	621	670
534	567	572	567	553	570	560	566	525	529	575	597	556	474	491	534	531	506	554	624	618	574	513	507	575	646	666

Nous avons calculé les pentes (tableau 7).

TABLEAU 7 Matrice des pentes ($^{0}/_{00}$)

19	17	16	19	28	10	21	16	33	27	13	3	4	20	40	45	54	48	40	40
18	19	15	23	24	6	20	17	29	39	35	36	42	39	5	25	43	55	53	41
11	16	25	31	18	5	20	27	19	12	22	29	37	47	49	25	13	11	11	9
5	18	31	23	24	18	11	27	32	20	13	17	18	25	42	41	41	42	36	43
6	18	22	19	27	38	31	8	21	27	28	33	24	6	25	37	46	46	30	33
18	24	24	20	22	37	41	27	5	9	15	31	43	27	15	31	40	43	33	28
17	24	32	23	19	21	30	32	9	29	31	21	24	44	35	27	19	21	42	28
25	19	31	28	19	11	24	31	8	32	22	32	26	20	46	44	36	17	23	29
30	9	21	28	24	16	25	30	9	32	20	19	35	25	11	34	47	48	22	13
23	14	8	14	19	18	27	32	8	30	26	16	29	41	40	17	22	43	40	22
14	21	13	3	9	17	24	31	9	29	26	24	29	47	52	36	34	35	18	27
17	17	14	6	7	18	27	28	12	20	33	39	34	29	38	31	41	33	30	16
17	10	4	7	8	9	29	40	29	9	33	46	40	19	12	29	29	12	33	33
5	5	4	5	8	3	15	31	36	25	26	48	42	22	5	33	35	30	27	44
12	11	10	7	13	7	13	32	31	37	22	30	33	31	35	40	38	36	33	48
27	18	9	14	15	17	15	22	33	35	31	21	28	28	48	49	30	26	27	26
32	23	19	25	23	16	11	10	25	28	36	25	27	40	60	48	11	13	3	23
30	30	35	27	14	7	8	5	9	11	26	40	46	53	57	34	12	20	12	32
8	36	38	29	22	21	17	18	13	12	14	43	58	42	16	33	28	19	10	33
30	10	32	37	35	33	30	27	24	14	39	54	38	18	18	26	37	21	9	24
33	28	5	12	14	12	18	22	29	37	48	49	16	28	30	21	31	20	17	47
33	35	25	23	30	28	22	13	25	42	53	47	19	22	43	33	14	30	37	62
30	38	28	20	34	31	41	41	23	38	42	42	44	9	33	48	23	24	61	61
32	34	34	24	33	42	48	38	44	70	38	5	43	36	13	27	36	13	74	53
30	40	38	40	38	50	30	15	45	44	28	37	34	46	20	30	20	33	64	20
21	42	46	41	53	29	18	10	33	24	22	55	32	44	18	24	19	55	51	24

Nous avons déterminé les orientations (tableau 8).

TABLEAU 8 Matrice des orientations

3	3	3	2	1	2	4	3	3	3	4	4	4	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	6	6	5
3	2	2	1	1	3	5	4	3	3	3	3	3	3	3	7	1	6	7	7	7	7	7	6	6	6
3	2	1	1	1	4	5	5	5	3	3	3	3	2	2	2	3	6	5	4	4	4	4	5	5	6
2	1	1	1	2	2	5	5	6	6	6	5	4	3	2	3	3	3	4	4	3	3	3	3	4	5
3	1	1	3	3	2	3	4	1	1	1	6	6	4	2	3	3	3	3	4	4	3	3	2	3	4
4	2	2	3	3	3	2	2	4	4	4	6	6	6	4	3	3	3	3	4	5	4	3	2	3	4
4	2	2	3	4	3	2	2	3	4	3	3	7	1	6	5	4	2	2	3	5	5	4	2	3	4
4	3	2	3	3	3	1	1	4	5	4	2	2	5	1	6	6	6	3	2	3	5	5	3	3	4
5	4	2	2	3	2	1	1	3	5	4	3	2	2	5	6	6	6	5	2	3	4	5	4	3	4
5	6	4	3	2	2	1	1	3	5	5	4	3	3	3	3	5	5	6	7	2	3	4	5	4	3
6	5	5	2	1	1	1	1	3	5	5	5	4	3	3	3	3	3	6	5	5	4	3	4	5	4
4	4	6	7	1	2	2	2	2	5	5	5	5	4	2	3	4	3	3	4	5	5	4	3	5	5
3	3	7	6	5	3	2	2	2	5	5	5	5	5	2	3	3	3	3	3	4	5	4	3	5	7
4	1	1	6	5	5	2	2	2	2	5	5	5	6	5	3	3	3	3	3	3	4	5	2	7	7
6	8	4	5	5	4	3	2	2	3	3	5	5	6	5	4	3	3	3	4	3	3	7	1	8	7
7	7	7	4	4	4	4	2	2	3	3	4	5	5	5	4	3	3	3	4	3	1	8	8	5	5
7	6	5	4	4	4	4	3	3	2	2	3	5	5	5	4	4	1	7	5	3	1	8	8	5	5
6	5	5	5	5	5	5	5	3	2	3	3	3	4	5	5	8	1	7	6	6	2	1	8	7	6
4	5	5	6	6	6	6	7	7	6	4	4	3	3	4	7	7	8	7	6	5	2	2	1	1	2
3	4	1	6	7	7	7	7	7	5	5	4	4	3	8	7	7	7	7	5	5	7	1	1	1	4
3	2	3	5	5	5	6	5	6	5	5	5	4	1	1	8	7	6	6	4	4	1	8	4	3	4
3	2	3	3	4	3	3	4	5	5	5	5	6	2	1	1	7	7	5	4	4	1	1	1	4	4
3	2	3	4	4	3	3	3	3	4	4	6	6	7	1	2	2	5	5	5	1	1	1	8	4	4
3	2	3	4	4	4	3	3	3	4	3	4	6	6	8	1	3	4	5	5	8	1	2	5	5	5
2	2	2	3	4	4	3	3	4	4	2	1	7	6	7	8	8	4	4	5	8	8	8	4	4	4
3	3	3	3	4	4	1	1	5	5	1	1	8	6	7	8	6	5	5	8	8	8	5	5	4	4

Le réseau de drainage et le masque du bassin (tableaux 9 et 10).

TABLEAU 9 Matrice du réseau de drainage

1	1	1	1	1	155	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	151	153	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	2	3	149	121	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	2	21	24	118	117	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	3	18	2	4	1	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	3	11	1	3	1	0	107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2	1	4	5	2	0	103	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	4	1	4	5	102	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	2	1	3	2	3	91	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	2	1	1	2	86	2	1	3	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	2	6	8	81	70	2	1	2	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	3	1	2	67	63	3	2	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	3	59	57	54	3	2	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2	1	2	50	41	2	1	3	2	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	3	5	38	5	4	4	3	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	2	3	1	2	30	8	3	2	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	8	13	11	2	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	3	1	2	6	2	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	2	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nous avons obtenu un bassin de 155 km^2 de superficie, alors que la surface du bassin calculé par la carte qui a servi à produire le MNA était évaluée à 260 km^2.

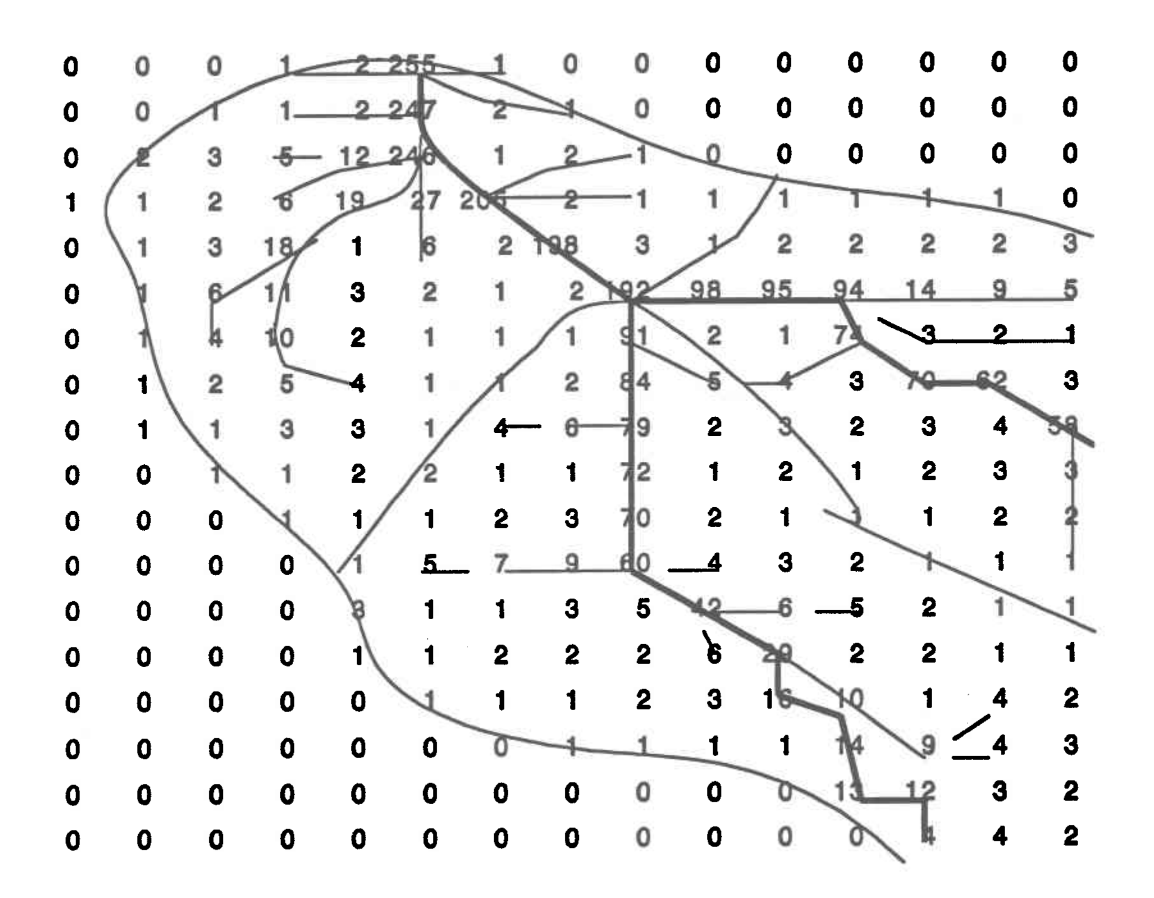
En comparant le réseau de drainage avec celui de la carte de la figure 44, nous avons constaté que nous avons obtenu en réalité le sous-bassin de la rivière Clifton. Celui de la Eaton Nord n'a pas été comptabilisé dans le bassin, ayant été oubliée.

TABLEAU 10 Matrice du bassin versant

0	0	0	0	−1	−1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	−1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	−1	−1	−1	−1	−1	0	−1	−1	−1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	−1	−1	−1	−1	−1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	−1	−1	−1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	−1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nous avons alors refait tout le processus mais cette fois en appliquant les traitements aux puits, plateaux et dépressions et nous avons obtenu les résultats illustrés par la figures 45.

FIGURE 45 Matrice 20x15 représentant une partie de la structure du bassin (réseau de drainage, cours d'eau, bassin et sous-bassins)



La superficie obtenue après cette deuxième simulation (figure 45) est de 255 km², ce qui nous rapproche beaucoup plus de la superficie effective. La structure du réseau de drainage est aussi plus fidèle à la réalité.

V. Validation du modèle Physitel

La version 2.04 de Physitel a été utilisé pour faire la validation. Nous avons choisi deux modèles numériques d'altitude obtenus à partir de différentes sources:

1) Le MNA du bassin de la rivière Eaton obtenu par numérisation de la carte au 1/250 000; et

2) Le MNA de la Malaisie obtenu à partir de l'imagerie du satellite SPOT.

A. Bassin Eaton/Clifton

Le bassin de la rivière Eaton au niveau de la station hydrologique 0300242 située en aval du pont sur l'autoroute 210, à Sawyerville, à environ 3 kilomètres en amont de la jonction de la rivière Clifton (image 1). Le MNA contient 227 rangées par 280 colonnes à une résolution spatiale au sol de 78m. Les coordonnées UTM des coins inférieur gauche et supérieur droit sont égales à 297295E, 5008010N et 319135E, 5025716N respectivement. Nous l'appellerons Eaton/Clifton pour une question de commodité.

Nous avons transformé l'échelle du MNA pour obtenir une grille régulière avec des carreaux de 500m x 500m afin de pouvoir afficher la totalité du bassin sur un seul écran et de permettre la distinction visuelle des carreaux. Les altitudes ont été intégrées en utilisant la valeur moyenne. La matrice résultante contient 35 rangées x 43 colonnes (image 2).

Nous avons calculé les pentes des carreaux par la méthode des différences finies (image 3). Il est à noter que le logiciel permet d'utiliser une autre option de calcul, la méthode de la plus forte dénivelé. Un approche mixte a aussi été développée, mais n'a pas encore été intégrée au modèle. Elle consiste à utiliser d'abord la méthode des différences finies et, lorsque la pente calculée est nulle, elle fait appel à celle de la plus forte dénivelé.

Nous avons déterminé les orientations dans les huit directions possibles (images 4 et 5). L'image 4 illustre les orientations codées par des couleurs différentes. Dans l'image 5, les orientations sont représentées par des flèches pour une question de clarté.

Nous avons tracé le réseau de drainage et le masque du bassin (image 6). Le bassin ainsi obtenu (image 6) a 109 carreaux, soit une superficie de 27.25 km^2, alors que la surface du bassin délimité manuellement sur la carte au 1:250 000 est évaluée à 220 km^2.

Nous avons refait tout le processus mais cette fois en appliquant les prétraitements automatiques au complet soit: le filtrage du MNA (image 7); le traitement des extremums locaux (image 8); le calcul des pentes (image 9); le calcul des orientations (images 10 et 11); la correction automatique des orientations (images 12 et 13); le traitement des puits, des plateaux, et des dépressions (le résultat de ces traitements a pour effet la modification des orientations, voir images 14 et 15); et la correction manuelle des orientations.

Il est à noter que, pour des raisons de calcul, la matrice des altitudes filtrées a 2 rangées et 2 colonnes de moins que la matrice originale. De même, toutes les matrices subséquentes (pentes, orientations, etc.) ont de nouveau 2 rangées et 2 colonnes de moins que la matrice des altitudes filtrées. Bien sûr, nous aurions pu conserver les dimensions initiales des matrices en donnant aux carreaux périphériques les valeurs de leurs voisins immédiats, mais pour des raisons d'intégrité, nous avons préféré carrément supprimer les rangées et les colonnes périphériques

Nous avons délimité le masque du bassin et nous avons calculé le réseau de drainage. Le bassin ainsi obtenu contient 220 carreaux, soit une superficie de 55 km^2 (image 16), ce qui est encore bien loin de la superficie réelle du bassin (220 km^2).

Nous avons modifié manuellement les orientations douteuses (images 17 et 18) et nous avons de nouveau délimité le masque du bassin (image 19), recalculé le réseau de drainage, et tracé les sous bassins (image 20). Le bassin obtenu couvre 804

carreaux, soit 201 km^2. Ce qui donne un écart de 19 km2 par rapport à la surface du bassin sur la carte au 1:250 000, soit une erreur d'environ 1%.

B Bassin de la rivière Sena, Malaisie

Le MNA a été obtenu à partir de l'imagerie du satellite SPOT par un corrélateur numérique avec une résolution au sol de 10m x 10m. Nous avons extrait une matrice de 600 rangées x 600 colonnes du bassin de la rivière Sena, au Nord-Est de la feuille de carte au 1:50 000, Nami de Malaisie, en amont du marécage. Les coordonnées géographiques du coin inférieur gauche sont égales à 100°53',513 de longitude Est et 6°10',892 de latitude Nord; celles du coin supérieur droit sont 100°56',778 et 6°14',135 respectivement. C'est une région au relief complexe (image 21).

Nous avons transformé l'échelle du MNA pour obtenir une grille régulière avec des carreaux de 150m x 150m (image 22). Les altitudes ont été intégrées en utilisant la valeur moyenne. La matrice ainsi obtenue contient 40 rangées x 40 colonnes.

Nous avons ensuite filtré le MNA (image 23); corrigé les extremums; calculé les pentes des carreaux par la méthode des différences finies (image 24); calculé les pentes; déterminé les orientations des pentes (images 25 et 26); corrigé les orientations de façon automatique (image 27); traité les puits, les plateaux et les dépressions (les images 28 et 29 montrent les orientations résultantes); modifié manuellement les orientations douteuses; déterminé le masque du bassin sur la base des orientations corrigées (image 30); et tracé les sous-bassins.

Le bassin ainsi obtenu couvre 827 carreaux, soit une superficie de 186 ha. Le bassin tracé sur la carte au 1:50 000 a une surface de 184 ha. Ce qui donne un écart de 2 ha entre les deux méthodes, soit encore moins de 1% d'erreur.

VI. Conclusion

La possibilité d'utiliser les données satellitaires et leurs dérivés à des fins hydrologiques ne fait plus de doute. Cependant, pour que cela se fasse de manière et efficace, il faudrait concevoir des outils hydrologiques capables d'assimiler directement ces nouvelles techniques d'information. Les différentes études ont démontré que, par exemple, les modèles hydrologiques existants n'étaient ni adaptés, ni facilement adaptables à ces nouvelles techniques d'acquisition et de traitement de l'information spatiale (Peck *et al.*, 1981). Le développement d'une nouvelle génération de modèles devenait ainsi critique. L'étude a eu pour objectif de développer un de ces outils, soit un modèle physiographique capable de construire une base des données physiques de bassin versant devant servir de données d'entrée au modèle hydrologiques. Cet objectif a été atteint puisque nous sommes à la version 2.04 du logiciel (Fortin et al., 1991). Dans sa phase actuelle de développement, PHYSITEL est bien adapté aux besoins d'HYDROTEL, lui-même en cours de développement.

Le résultat de cette thèse est donc la conception et le développement d'un logiciel physiographique, PHYSITEL, composé d'une vingtaine de programmes opérationnels, qui exploite les modèles numériques de terrain pour des besoins hydrologiques. La représentation "tridimensionnelle" de la topographie par les MNT est en voie de remplacer les méthodes traditionnelles de cartographie. Ces MNT deviennent de plus en plus disponibles sur le marché et à des coûts avantageux.

Nous avons validé le modèle PHYSITEL avec un extrait du MNT de 250 carreaux x 250 carreaux, obtenu par numérisation de la carte au 1:250 000 de Sherbrooke, plusieurs petits MNT de 100 carreaux x 100 carreaux de la région de Sherbrooke et un MNA de 600 carreaux x 600 carreaux de la Malaisie dérivé de l'imagerie du satellite SPOT.

Une variante du modèle a été développée et utilisée pour la détermination automatique du paramètre topographique de l'équation universelle d'érosion des sols "USLE" (Benmouffok et al., 1989). Elle a été testée avec succès sur un modèle numérique de terrain de la région de Waterville au Québec.

L'organisation modulaire de PHYSITEL, le langage de programmation utilisé et la structure de sa base de données lui permettent d'évoluer facilement en fonction des besoins d'HYDROTEL et d'autres modèles hydrologiques qui voudront l'adopter. Le défi à venir pour PHYSITEL est de passer de la condition expérimentale "presque-fini" à celle de "tout-à-fait" opérationnelle. Ce défi déborde les aspects de recherche appliquée pour rejoindre ceux du développement opérationnel et de la commercialisation.

Les caractéristiques physiographiques des bassins versants dérivées par PHYSITEL peuvent servir comme information d'appoint pour l'analyse de l'imagerie satellitaire, surtout pour l'interprétation de thèmes sensibles aux formes du terrain. Il arrive que des objectifs difficiles à discerner dans l'image deviennent plus faciles quand on dispose de données sur la morphologie du terrain sous forme compatible. C'est, notamment, le cas des orientations de pentes, dont dépendent l'ensoleillement et la fonte des neiges; la distinction des lacs avec l'ombre des nuages; la localisation des cours d'eau secondaires, etc. Ces caractéristiques physiographiques peuvent aussi servir à corriger les modèles numériques de terrain en se basant sur les formes du terrain (lignes de crêtes, talwegs, plans d'eau, réseau de drainage).

L'enseignement important que nous avons tiré de cette recherche est que le développement de la capacité de calcul, de mémoire, et la vitesse d'accès aux données des micro-ordinateurs préconisent l'utilisation de techniques numériques simples pour la résolution de problèmes, sur la base de déductions logiques et de la connaissance du comportement du phénomène étudié. La méthode utilisée pour solutionner les ambiguïtés d'écoulement par l'analyse d'une série de cas particuliers faciles à programmer peut être plus efficace que des méthodes beaucoup plus complexes d'analyse mathématique difficiles à implanter.

Le décalage entre la recherche fondamentale, la recherche appliquée et le développement de modèles opérationnels est très prononcé et ne cesse de s'agrandir avec l'évolution rapide des équipements informatiques. C'est ce que Traub (1989) appelle "Crise des logiciels". A l'issue d'une analyse des systèmes d'information géographique, Frank *et al.* (1991) ont constaté le déséquilibre existant entre les équipements, les logiciels, les données et les utilisateurs. Ce déséquilibre est dû,

principalement, aux faibles investissements consentis pour adapter les données et les techniques avancées à des besoins réels. Pour combler ce retard, Il faudrait accroître les efforts en recherche et développement de logiciels scientifiques appliqués à la gestion des ressources naturelles et, plus particulièrement, à la gestion des ressources hydriques, dans le cas qui nous concerne.

Entre le moment où nous avons commencé le développement du modèle en 1985 et celui où nous l'avons achevé en 1989, la plupart des paramètres des équipements: la capacité mémoire, la vitesse de calcul, la vitesse d'accès au données ont été multipliés par entre 5 et 15 par rapport aux coûts. Les logiciels ont aussi évolué mais moins vite. PHYSITEL est à la version 2.04 sans avoir encore définitivement franchi la phase recherche et test pour passer en phase opérationnelle. Cependant, il ne faut pas s'en inquiéter outre mesure, les données statistiques disponibles attestant que le processus de développement et d'introduction de nouvelles idées prennent entre huit à dix ans pour porter fruit.

RÉFÉRENCES

Anderson, E.A., 1973, National Weather Service River Forecast System - Snow Accumulation and Ablation Model. NOAA technical Memorandum NWS Hydro-17, U.S. Dept of Commerce, Silver Spring, Maryland, 217 p.

Arcelli, C., G. Sanniti, 1981, A thinning algorithm based on prominence detection, Pattern Recognition, vol. 13, no. 3, pp. 225-235.

Band, L.E., 1989, A System, Hydrological Processes, vol. 3, pp. 151-162.

Band, L.E., 1986, Topographic partition of watersheds with digital elevation models, Water Resources Research, Vol. 22-1, p. 15-24.

Band, L.E., 1986, Topographic Partition of Watershed with Digital Elevation Models, Water Resources Research, vol. 22, no. 1, pp. 15-24, January 1986.

Band, L.E., 1984, Extraction of Topographic Networks from Digital Elevation Data, Proceedings of the 18th. International Symposium on Remote Sensing of Environment, October 1-4, Paris, pp. 1795-1802.

Baudoin, A., 1984, "Application of SPOT and D.T.M. to Cartography, Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, vol. 1, Paris, France, October 1-5, 1984, pp. 61-74.

Benmouffok, D., D.N.H. Horler, R. Leconte, 1989, Automatic Determination of the Topographic Factor Required in the Universal Soil Loss Equation, IGARSS'89, 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Canada, July 10-14.

Benmouffok, D., J.P. Fortin, Lise Potvin, Guy Rochon, 1985, Estimation des données physiographiques et d'occupation des sols pour la modélisation hydrologique, Télédétection et gestion des ressources: l'aspect opérationnel, vol. 5 , Bernier, Lessard

et Gagnon (éd.), Comptes rendus du 5e congrès de l'association Québécoise de télédétection, Chicoutimi, Québec, pp. 475-502.

Benmouffok, D., 1983, Intégration des données physiographiques obtenues à partir d'images LANDSAT au modèle hydrologique CEQUEAU, Thèse de maîtrise ès sc., Université Laval, 182 p.

Biggin, M.G., 1976, Automated Delineation of Ground Slope, Proceedings of the American Congress on Surveying and Mapping, 36th. Annual Meeting, February 22-28, Washington, D.C., pp. 413-419.

Bowley, C.J., J.C. Barnes, A. Rango, 1981, Applications systems verification and transfer project, v. VIII: Satellite snow mapping and runoff prediction handbook. NASA Technical paper 1829, 87 p.

Brockelbank, D.C., A.P. Tam, Stereo Elevation Determination Techniques for SPOT Imagery, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vo. 57, no. 8, August 1991, pp. 1065-1073.

Campbell, J.B., R.M. Haralck, S. Wang, 1984, Integration of Topographic Relief From Digital Multispectral Imagery, SPIE, vol. 475, Remote Sensing, pp. 98-115.

Catlow, D.R., D. Du, 1984, The structuring and Cartographic Generalisation of Digital River Data, Technical Papers, 44th. ACSM Annual Meeting, pp. 511-520.

Collins, S.H., Terrain Parameters Directly From a Digital Terrain Model, The Canadian Surveyor, vol. 29, no. 5, pp. 507-518, December 1975.

Colvocoresses, A.P., 1990, An Operational Earth Mapping and Monitoring Satellite System: A Proposal for LANDSAT 7, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56, no. 5, May 1990, pp. 569 571.

Cormary, Y., A. Guilbot, 1971, Ajustement et réglage des modèles déterministes, méthodes de calage des paramètres. La Houille Blanche, no 2, p. 131-140.

Crawford, N.H., R.K. Linsley, 1966, Digital Simulation in Hydrology: Stanford watershed model IV. Dept of Civil Engineering, Stanford University, Techn. Rep. 39, 220 p.

Crawford, N.H., R.K. Linsley, 1964, A conceptual model of the hydrologic cycle: IASH Pub. no 63, pp. 573-587.

Depraetere, C., 1989, Étude géomorphologique du bassin-versant de Booro-Borotou à partir d'un modèle numérique de terrain: Structure et fonctionnement hydropédologique d'un petit bassin-versant de savane humide, Collection Études et Thèses, Journée hydropédologique, IFRSDC, ORSTOM, Montpellier,1989.

Eindenshink, J.C., F.A. Schmer, 1979, "Remote Sensing Inputs to National Model Implementation Program for Water Resources Quality Improvement, Joint Proceedings of the ASP-ACSM 1979 Fall Technical Meeting, pp. 165-171.

Fairfield, J., P. Leymarie, 1991, Drainage Networks From Grid Digital Elevation Models, Water Resources Research, vol. 27, no. 5, pp. 709-717, May 1991.

Fortin, J.P., J.P. Villeneuve, D. Benmouffok, M. Montminy, C. Blanchette, 1991, PHYSITEL 2.0 User's Guide, Scientific Report INRS-Eau, no. 287, 31 January 1991, 113 p.

Fortin, J.P., J.P. Villeneuve, A. Guilbot, B. Seguin, 1986, Development of a modular hydrological forecasting model base on remotely sensed data, for interactive utilisation on a microcomputer. Hydrologic Applications of Space Technology, Proceedings of the Cocoa Beach Workshop, Florida, August 1985. IAHS Publ. no. 160.

Fortin, J.P., G. Morin, W. Sochanska, L. Potvin, 1983, Utilisation de la télédétection pour améliorer la précision des crues de fonte de neige simulées par le modèle CEQUEAU. Symposium on Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission (AISH), Hambourg, 1983.

Fortin, J.P., J.P. Lardeau, G. Morin, W. Sochanska, J.C. Rassam, 1979, Comparaison du retrait du manteau nival calculé par le modèle hydrologique CEQUEAU au retrait estimé à l'aide des images satellite ESSA-8, Colloque canadien d'hydrologie: 79 - Hydrologie des climats froids, Vancouver (C.-B.), 10-11 mai.

Girard, G., G. Morin, R. Charbonneau, 1972, Modèle précipitations -débits à discrétisation spatiale. Cahiers ORSTOM, Série hydrol. volume IX, no 4.

Girard , G., J.P. Fortin, R. Charbonneau, 1971, un modèle hydrométéorologique simplifié et quelques applications régionales. Symposium international sur les modèles mathématiques en hydrologie, AIHS, Varsovie.

Garbrecht, J., 1988, Determination of the execution sequence of channel flow for cascade routing in a drainage network, Hydrodoft, vol.1, no. 3, pp. 129-138.

Hannah, M.J., 1981, Error Detection and Correction in Digital Terrain Models, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 47, no. 1, January 1981, pp. 63-69.

Hannah, M.J., 1979, Error Detection and Rectification in Digital Terrain Models, Joint Proceedings of the ASP-ACSM Fall Technical Meeting, Sioux Falls, South Dakota, 17-21 September 1979, pp. 152-164.

Hardy, R.L., 1972, The Analytical Geometry of Topographic Surfaces, American Congress on Surveying and Mapping, March 12-17, pp. 163-181.

Horton, R.E., 1945, Erosional Development of Streams and their Drainage Basins: Hydrological Approach to Quantitative Morphology, Bulletin of the Geological Society of America, vol. 56, pp. 275-370.

Jenson, S. and J.O. Domingue, 1988, Software tools to extract topographic structure from digital geographic information system analysis, U.S. Geological Survey, 27 p.

Jenson, S.K., 1985, Automated Derivation of Hydrologic Basin Characteristics from Digital Elevation Models, Proceedings of Auto-Carto 7, Digital Representation of Spatial Knowledge, pp. 301-310, ASP and ASSM, Washington, D.C.

Junkins, J.L., J.R. Jancaitis, 1971, Mathematical Terrain Analysis, American Congress on Surveying and Mapping, March 7-12, pp. 658-678.

Kikuchi, L., J.A. Guevara, D. Mark, D.F. Marble, 1982, Rapid Display of Digital Elevation Data in a Mini-Computer Environment, Proceedings, ISPRS Commission IV Symposium 1982, Fifth International Symposium on Computer Assisted Cartography and ISPRS IV Proceedings 1982, pp. 297-307.

Lammers, R.B., L.E. Band, 1990, Automating Object Representation of Drainage Basins, Computer and Geosciences, vol. 16, no. 6, pp. 787-810.

Leclerc, A., 1988, Le système Carto-Spot, Compte-rendus du Symposium international sur les applications topographiques des données SPOT, Sherbrooke, Québec, pp. 86-100.

Makarovic, B., 1984, Structures for geo-information and their application in selective sampling for digital terrain models, ITC Journal, vol. 4.

Mark, D., 1988, Modelling Geomorphological Systems, Edited by M.G. Anderson, John Wiley & Sons, 1988, pp. 73-96.

Mark, D.M., M.D. Gould, 1991, Interaction with Geographic Information: A Commentary, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 57, no. 11, November 1991, pp. 1427-1430.

Marks, D., J. Dozier, J. Frew, 1984, Automated Basin Delineation from Digital Terrain Data, Geo-Processing, vol. 2, pp . 299-311.

Marks, D.J., J. Frew, 1982, Automated Basin Delineation from Digital Terrain Data, NASA Technical Memorandum 84984, 21 p., 1982.

Martinec, J., 1982, Runoff modelling from snow covered area. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, volume GE-20, no.3, July, p. 259-262.

Martz, L.W., Garbrecht, J., 1993, Generation of network and subwatershed parameters from digital elevation models, GIS'93 Symposium, Vancouver, BC, February 1993, pp. 337-352.

Martz, L.W., Garbrecht, J., 1992, Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas From Digital Elevation Models, Computer & Geosciences, vol. 18, no 6, pp. 747-761.

Martz, L.W., E. De Jong, 1988, Catch: A Fortran Program for Measuring Catchment Area from Digital Elevation Models, Computer & Geosciences, vol. 14, no 5, pp. 627-640.

Morin, G., J.P. Fortin, J.P. Lardeau, W. Sochanska et S. Paquette, 1981, Modèle CEQUEAU: manuel d'utilisation, INRS-Eau, rap. sci. no. 93, 449 p., Université du Québec.

Morin, G., J.P. Fortin, J.P. Lardeau, W. Sochanska et S. Paquette, 1981, Modèle CEQUEAU: manuel d'utilisation, INRS-Eau, rap. sci. no 93, 449 p., Université du Québec.

Morris, D.G., R.G. Heerdegen, 1988, Automatically Derived Catchment Boundaries and Channel Networks and Their Hydrological Applications, Geomorphology, 1, pp. 131-141.

O'Callaghan, J.F., D.M. Gelbman, 1984, The extraction of drainage networks from digital elevation data, Comput. Vision Graphics Image Processing, vol. 28, p. 323-344.

Papo, H.B., E. Gelbman, 1984. Digital terrain models for slopes and curvatures. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50-6, p. 695-701.

Peck, E.L., T.N. Keeper, E.R. Johnson, 1981, Strategies for using remotely sensed data in hydrologic models. NASA-CR-66729, 77 p.

Perchalski, F.R., 1986, Aerial photography for regional soil loss estimates. Remote Sending and Land Information Systems in the Tennessee Valley Region, Proc., Chattanooga, TN. Oct. 24-25 p. 34-42.

Peucker, T.K., D.H. Douglas, 1975, Detection of Surface-Specific Points by Local Parallel Processing of Discrete Terrain Elevation Data, Computer Graphic and Image Processing, vol. 4, pp. 375-387.

Qian, J., R.W. Ehrich, J.B. Campbell, 1990, DNESYS - An Expert System For Automatic Extraction of Drainage Networks From Digital Elevation Data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No 1, January 1990

Rango, A., 1975, Operational Applications of Satellite snowcover observations. NASA Spec. Publ. 391, 430 p.

Ritter, P., 1987, A vector-based slope and aspect generation algorithm, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 53-8, p. 1109-1111.

Robinove, C.J., 1969, Space Technology in Hydrological Applications. The Progress of Hydrology. Proc. First Ont. Sem. for Hydrology Professors. Urbana, U.S.A., volume 1. New developments in hydrology, p. 88-107.

Rosenfield, A., A. Kak, 1982, Digital Picture Processing , 2nd edit., vol. 2, Academic, Orlando, Florida.

Rui, L., D.L.B. Jupp, B.A. Harrison, A. Waqar, 1986, Extraction of landform information from remotely sensed data: an initial study. Beijing Int. Symp. on Remote Sensing. Beijing, China, Nov. 18-22, p. 67-73.

Scheidegger, A.E., On the Topology of River Nets, Water Resources Research, vol. 3, no. 1, pp. 103-106.

Seguin, B., 1980, Détermination de l'évaporation dans les bilans hydrologiques par la télédétection en thermographie infra-rouge. Bull. des Sciences hydrologiques 25.2.26, p. 143-153.

Shreve, R.L., 1966, Statistical law of stream numbers, Journal of Geol., vol. 74, pp. 17-37.

Shreve, R.L., 1967, Infinite topological random channel networks, Journal of Geol., vol. 75, pp. 178-186.

Simard, R., V.G. Krishna, 1983, A Successful Approach in Three-Dimensional Perception of Stereo LANDSAT-MSS Images Over Cordilleran Relief, 1983 Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium with Special Emphasis on Natural Resources Evaluation, June 21-23, 1983, pp. 31-40.

Smart, J.S., 1970, Use of Topologic Information in Processing Data for Channel networks, Water Resources Research, vol. 6, no. 3, June 1970, pp. 932-936.

Speight, J.G., 1968, Parametric Description of Land Form, Stewart, G.A., Editor, Land Evaluation, Papers of a CSIRO Symposium in Co-operation with Unesco, 23-26 August, 1968, pp. 239-250.

Snell, E.A., 1984, A manual for regional targeting of agricultural soil erosion and sediment loading to streams, Working paper N¯36, Environment Canada, Lands Directorate, Environmental Conservation Service: 50 pp.

Su, Z., P. Neumann, W. Fett, A. Schumann, G.A. Schultz, 1992, Application of Remote Sensing and Geographic Information System in Hydrological Modelling, EARScL. Advances in Remote Sensing, vo. 1, no. 3, pp. 180-185

Swann, R., D. Kauffman, B. Sharpe, 1988, Results of Automated Digital Elevation Model Generation from SPOT Satellite Data, paper presented at ISPRS Kyoto, Japan, July 1-10, 1988, 7 p.

Traub, J., 1989, Scaling Up: A Research Agenda for Software Engineering, National Academic Press, Washington, D.C.

U.S. Army Corps of Engineers, 1975, Program Description and User Manual for SSARR - Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation. U.S. Army Engineer Division North Pacific, Portland, Oregon, Program 724-K5-60010.

Van der Grient, C., 1986, Automated catchment basin delineation for use with a regional stream sediment exploration program, B.Sc. thesis. Carleton University, Department of Geology, Ottawa, Ontario, 62 p.

Vigneron, C., P. Denis, 1984, Stéréorestitution d'images SPOT à l'aide du logiciel TRASTER IGN/MATRA, Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, vol. 1, Paris, France, October 1-5, 1984, pp. 455-464.

Villeneuve, J.P., D. Isabel, 1984, Le modèle hydrologique MDOR et sa calibration automatique. Colloque sur la simulation numérique appliquée au domaine de la ressource hydrique. 52e Congrès de l'ACFAS. Université Laval, Québec 9-10 mars 1984.

Yuan, L.-P., N.L. Vanderpool, 1986, Drainage Network Simulation, Computer & Geosciences, vol. 12, no 5, pp. 653-665.

IMAGE 1 MNA du bassin Eaton/Clifton (résolution 78m)

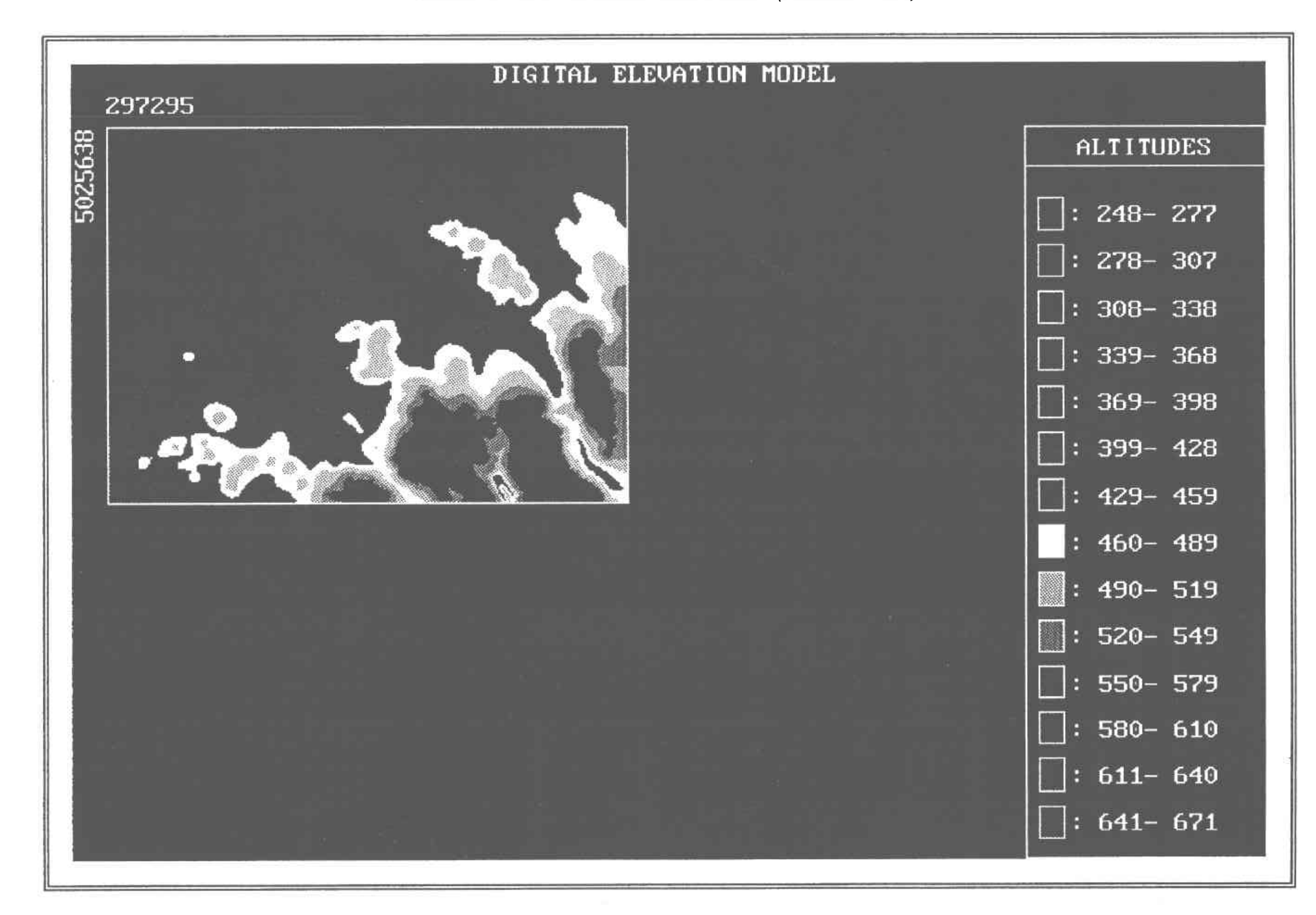


IMAGE 2 MNA Eaton/Clifton (résolution 500m)

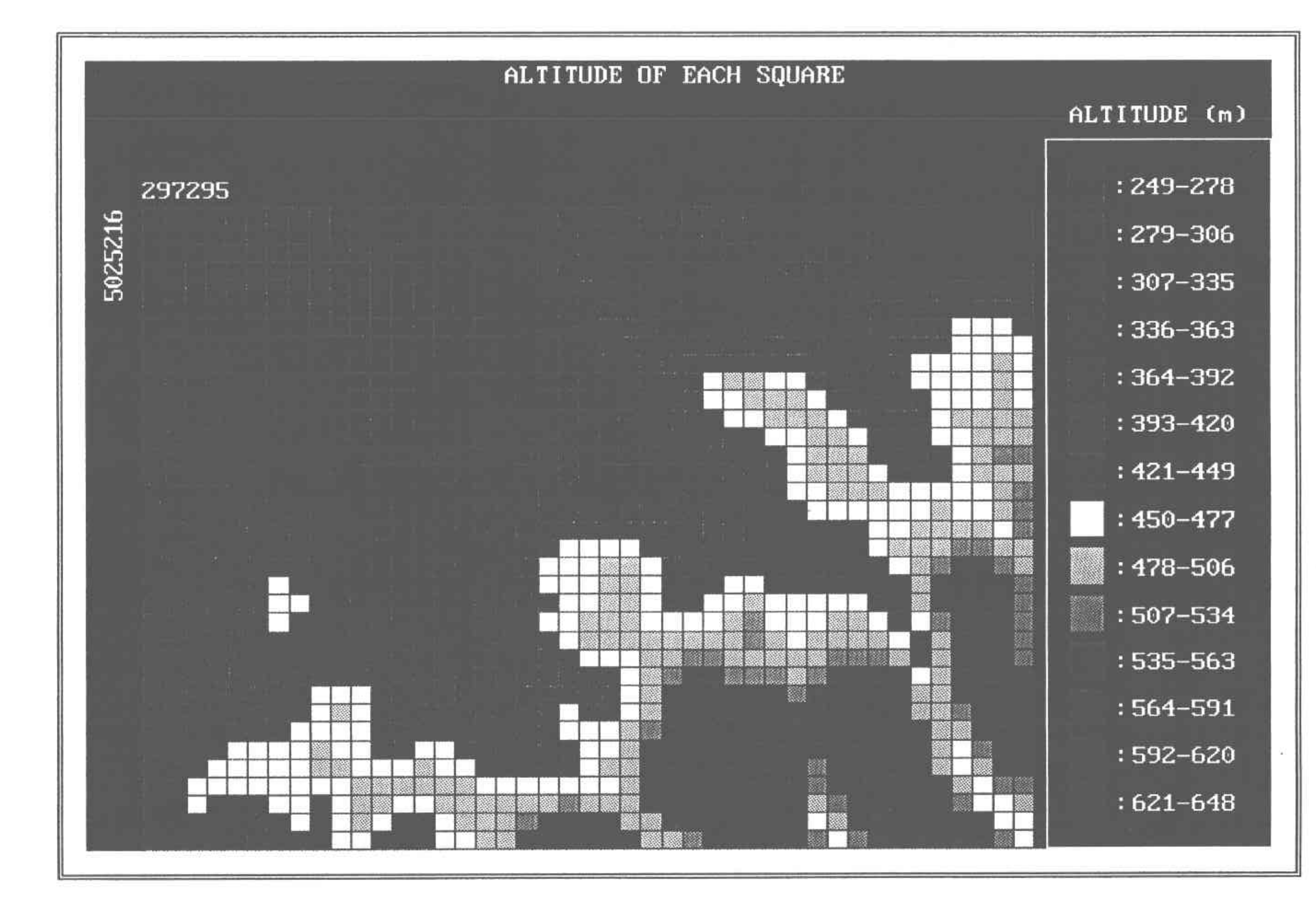


IMAGE 3 Eaton/Clifton: Calcul des pentes

IMAGE 4 Eaton/Clifton: Calcul des orientations des pentes

ASPECT OF EACH SQUARE

297795

5024716

ASPECT

: E
: NE
: N
: NW
: W
: SW
: S
: SE
: FL

IMAGE 5 Eaton/Clifton: Orientations des pentes codées par des flèches

ASPECT OF EACH SQUARE

ASPECT

: E
: NE
: N
: NW
: W
: SW
: S
: SE
: FL

297795

5024716

IMAGE 6 Eaton/Clifton: Masque du bassin

BASIN MASK

297795

5024716

: OUTSIDE

: INSIDE

IMAGE 7 MNA Eaton/Clifton: Filtrage

IMAGE 8 MNA Eaton/Clifton: Correction des extremums

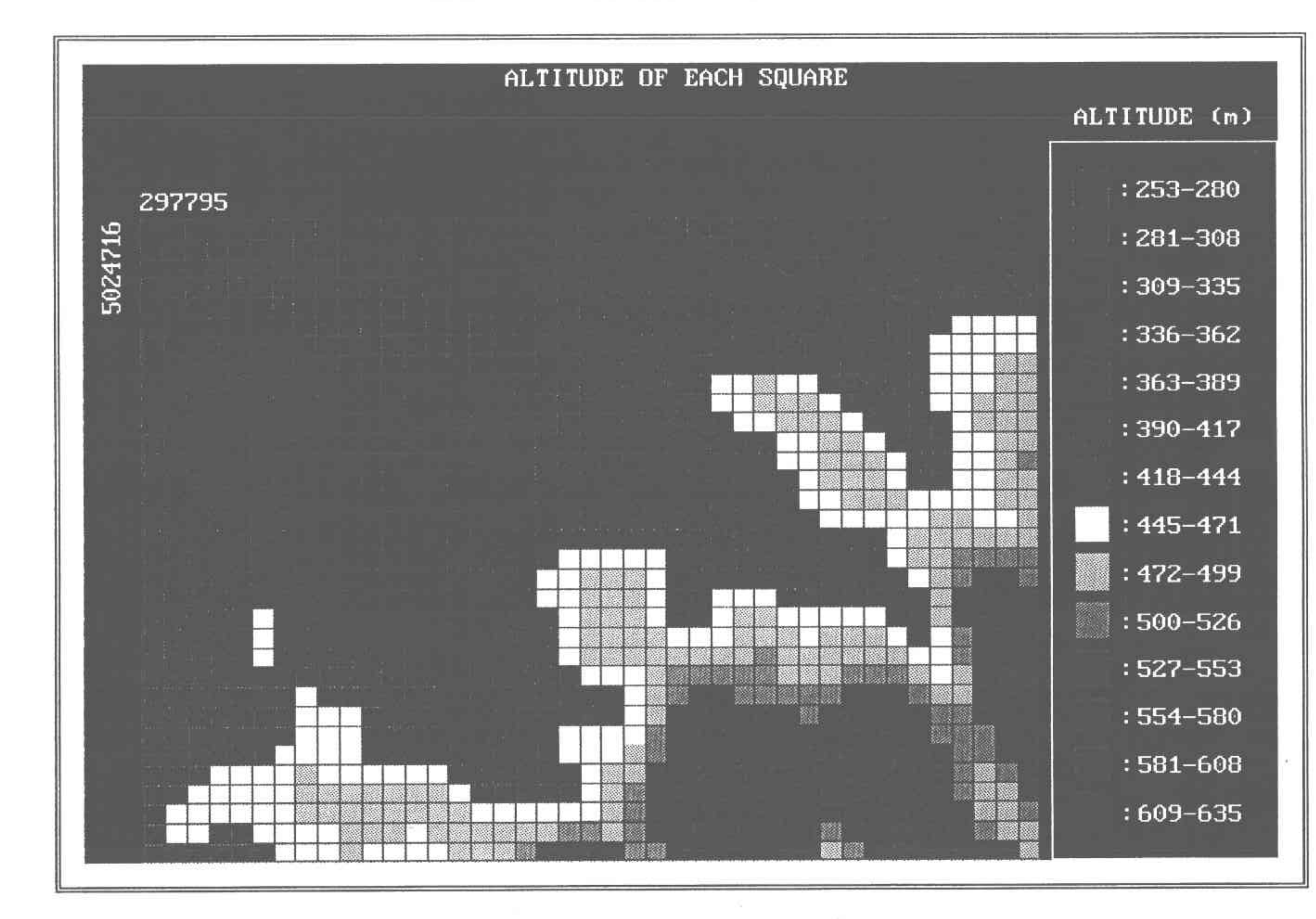


IMAGE 9 Eaton/Clifton: Calcul des pentes du MNA corrigé

SLOPE OF EACH SQUARE

298295

5024216

SLOPE(m/m)*1000

: 1- 10
: 11- 18
: 19- 27
: 28- 35
: 36- 44
: 45- 52
: 53- 61
: 62- 70
: 71- 78
: 79- 87
: 88- 95
: 96-104
: 105-112
: 113-121

IMAGE 10 Eaton/Clifton: Calcul des orientations des pentes du MNA corrigé

IMAGE 11 Eaton/Clifton: Orientations des pentes codées par des flèches

IMAGE 12 Eaton/Clifton: Correction automatique des orientations

IMAGE 13 Eaton/Clifton: Correction automatique des orientations (flèches)

IMAGE 14 Eaton/Clifton: Matrice des orientations après traitement des plateaux et des dépressions

ASPECT OF EACH SQUARE

298295

5024216

ASPECT

: E

: NE

: N

: NW

: W

: SW

: S

: SE

: FL

IMAGE 15 Eaton/Clifton: Matrice des orientations après traitement des plateaux et des dépressions (flèches)

IMAGE 16 Eaton/Clifton: Masque du bassin après traitement des plateaux et des dépressions

IMAGE 17 Eaton/Clifton: Correction interactive des orientations

ASPECT OF EACH SQUARE

298295

5024216

ASPECT

: E
: NE
: N
: NW
: W
: SW
: S
: SE
: FL

IMAGE 18 Eaton/Clifton: Correction interactive des orientations (flèches)

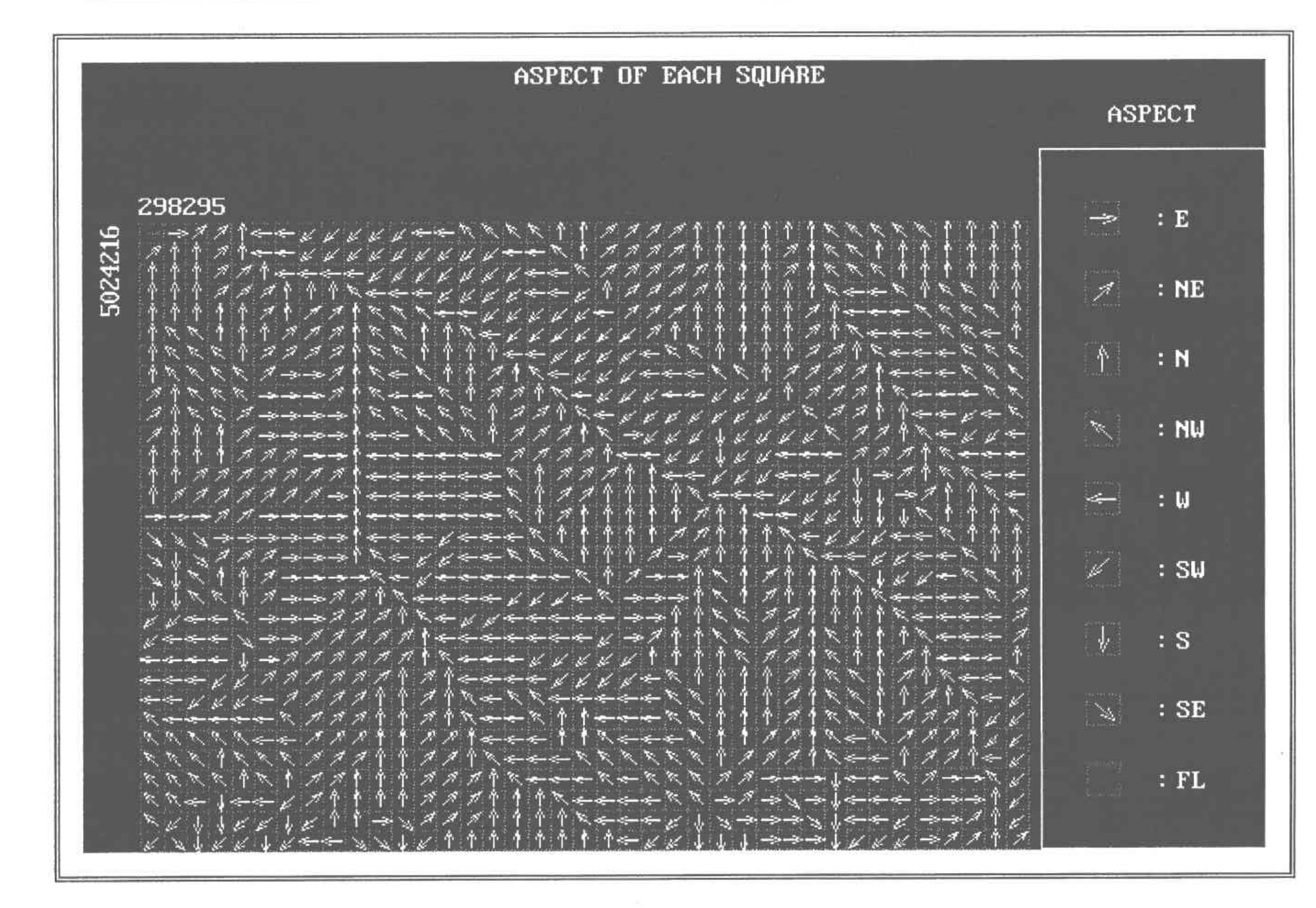


IMAGE 19 Eaton/Clifton: Masque du bassin après correction interactive des orientations

IMAGE 20 Eaton/Clifton: Sous-bassins et orientations des carreaux

IMAGE 21 MNA de la rivière Sena (résolution 10m)

DIGITAL ELEVATION MODEL

709344

689590

ALTITUDES

- 111- 138
- 139- 167
- 168- 195
- 196- 223
- 224- 251
- 252- 280
- 281- 308
- 309- 336
- 337- 365
- 366- 393
- 394- 421
- 422- 449
- 450- 478
- 479- 507

IMAGE 22 MNA de la rivière Sena (résolution 150m)

ALTITUDE OF EACH SQUARE

709344

689450

ALTITUDE (m)

: 99-131
: 132-163
: 164-195
: 196-227
: 228-259
: 260-291
: 292-323
: 324-354
: 355-386
: 387-418
: 419-450
: 451-482
: 483-514
: 515-546

IMAGE 23 MNA de la rivière Sena: Filtrage des altitudes et correction des extremums

ALTITUDE OF EACH SQUARE

709494

689300

ALTITUDE (m)

: 109-137
: 138-165
: 166-194
: 195-222
: 223-250
: 251-278
: 279-307
: 308-335
: 336-363
: 364-391
: 392-419
: 420-448
: 449-476
: 477-504

IMAGE 24 Rivière Sena: Calcul des pentes

SLOPE OF EACH SQUARE

709644

689150

SLOPE(m/m)*1000

: 7- 36
: 37- 66
: 67- 95
: 96-124
: 125-154
: 155-183
: 184-213
: 214-242
: 243-271
: 272-301
: 302-330
: 331-359
: 360-389
: 390-418

IMAGE 25 Rivière Sena: Calcul des orientations

IMAGE 26 Rivière Sena: Orientations des pentes codées par des flèches

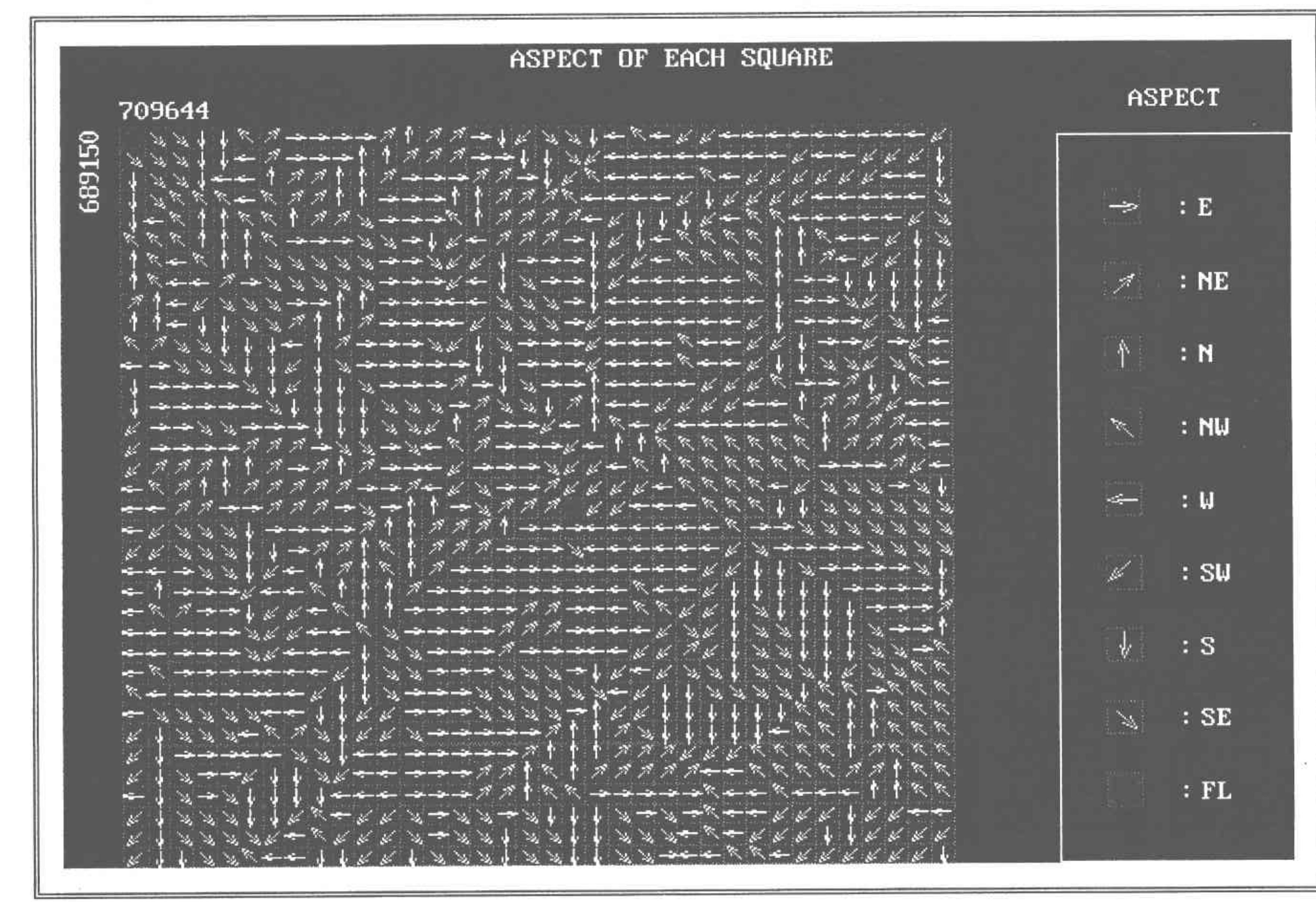


IMAGE 27 Rivière Sena: Correction automatique des orientations

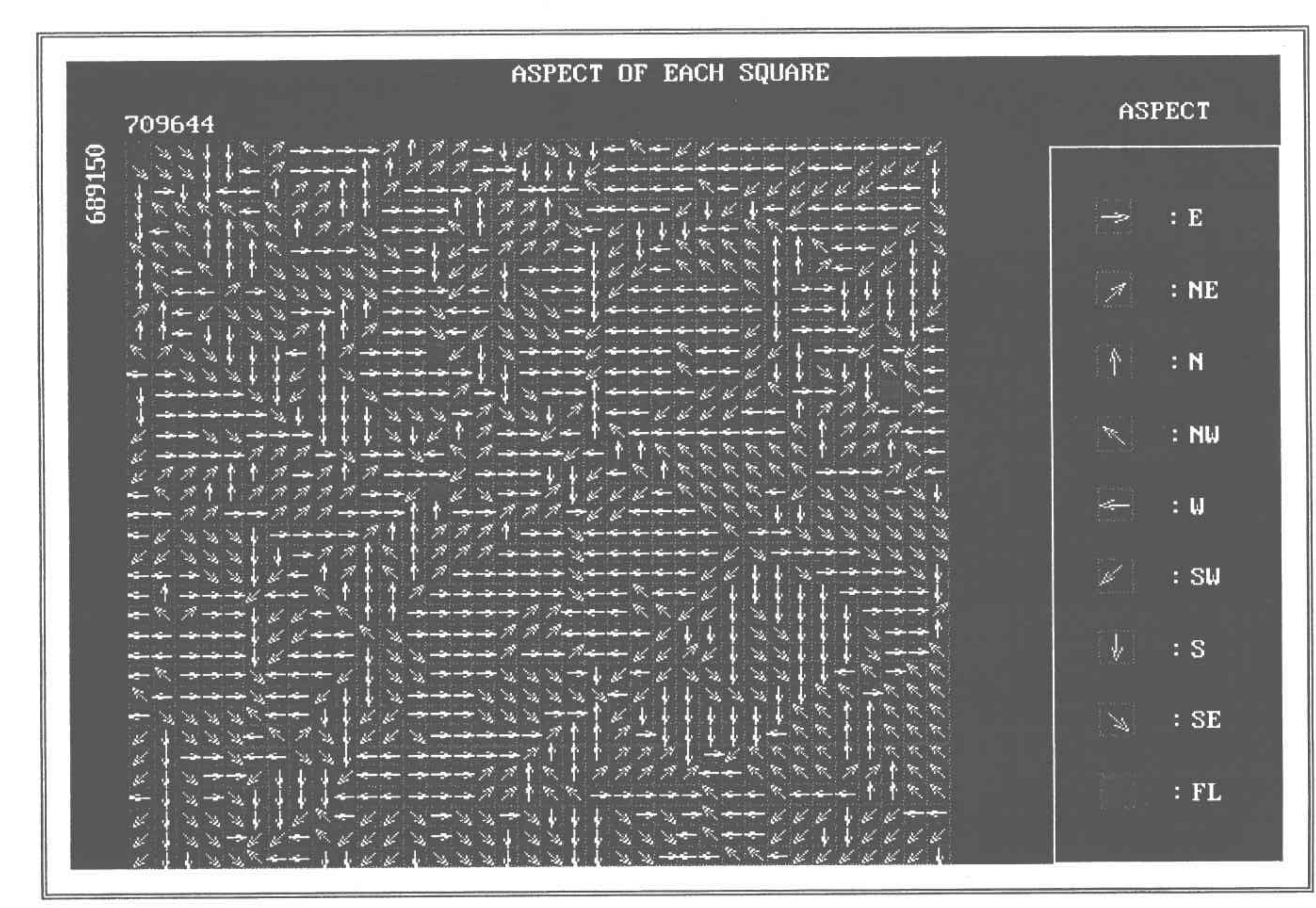


IMAGE 28 Rivière Sena: Matrice des orientations après traitement des plateaux et des dépressions

IMAGE 29 Rivière Sena: Matrice des orientations après traitement des plateaux et des dépressions (flèches)

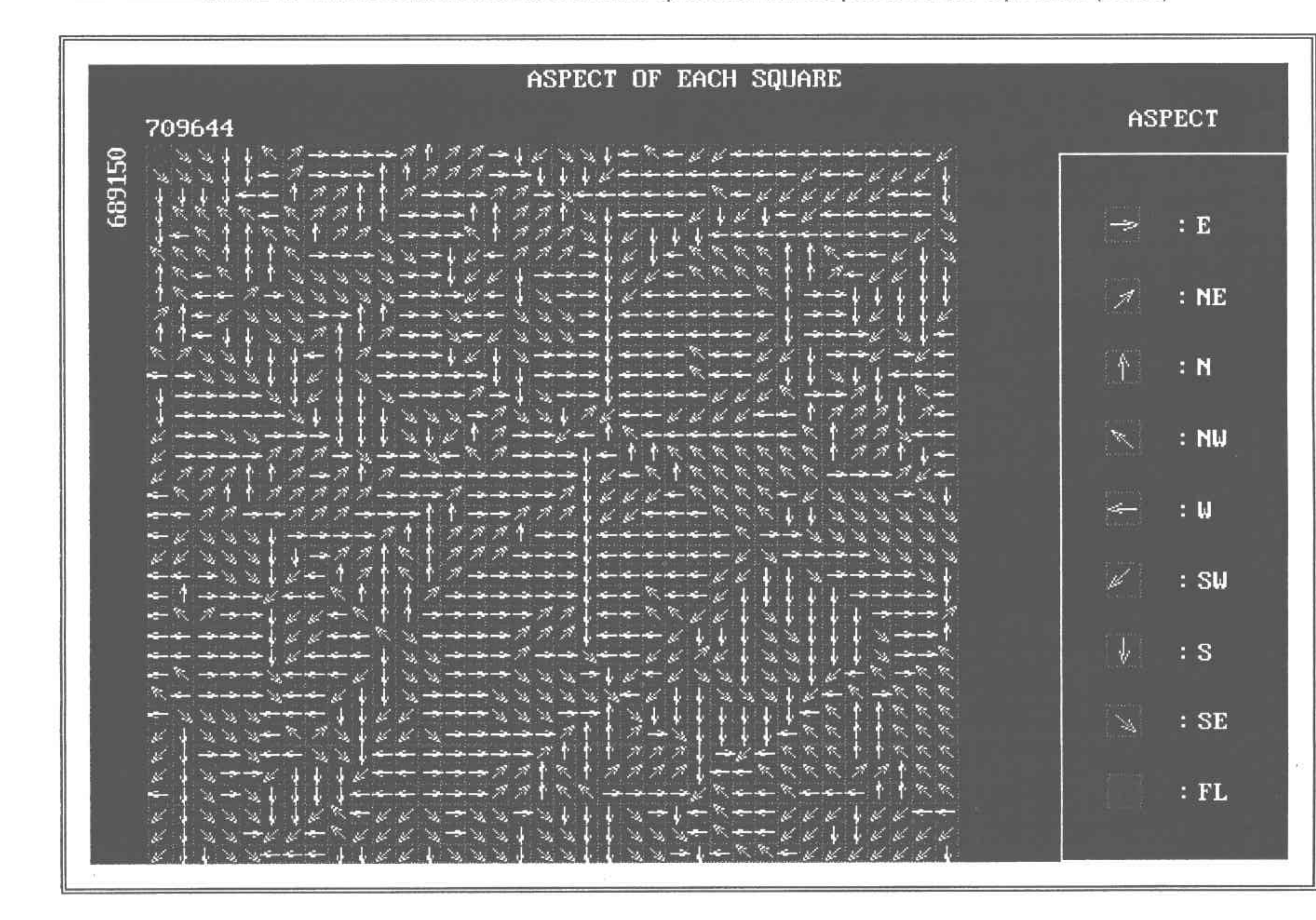


IMAGE 30 Rivière Sena: Masque final du bassin

IMAGE 31 Rivière de la Sena: Sous-bassins et orientations des carreaux

SUB-BASSINS

709644

689150

MESSAGE

+

DISPLAY